

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA**  
**FACULDADE DE ECONOMIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECONOMIA**

**DRYELLI JALES COSTA**

**OS EFEITOS ECONÔMICOS DA EXPANSÃO DOS BIOINSUMOS NO BRASIL**

Juiz de Fora

2026

**DRYELLI JALES COSTA**

**OS EFEITOS ECONÔMICOS DA EXPANSÃO DOS BIOINSUMOS NO BRASIL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Economia da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Doutora em Economia.  
Área de concentração: Economia

Orientador: Prof. Dr. Weslem Rodrigues Faria  
Coorientador: Prof. Dr. Admir A. Betarelli Jr

Juiz de Fora  
2026

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Jales Costa, Dryelli .

OS EFEITOS ECONÔMICOS DA EXPANSÃO DOS  
BIOINSUMOS NO BRASIL / Dryelli Jales Costa. -- 2026.  
208 f.

Orientador: Weslem Rodrigues Faria

Coorientador: Admir Antonio Betarelli Junior

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Juiz de Fora,  
Faculdade de Economia. Programa de Pós-Graduação em  
Economia, 2026.

1. Agricultura. 2. Bioinsumos. 3. Insumos químicos. 4. Equilíbrio  
Geral Computável. 5. Produtividade agrícola. I. Rodrigues Faria,  
Weslem , orient. II. Betarelli Junior, Admir Antonio , coorient. III.  
Título.

**Dryelli Jales Costa**

**Os efeitos econômicos da expansão dos bioinsumos no Brasil**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Economia da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Doutora em Economia. Área de concentração: Economia.

Aprovada em 13 de julho de 2026.

**BANCA EXAMINADORA**

**Dr. Weslem Rodrigues Faria** - Orientador

Universidade Federal de Juiz de Fora

**Dr. Admir Antonio Betarelli Junior** - Coorientador

Universidade Federal de Juiz de Fora

**Dr.<sup>a</sup> Flaviane Souza Santiago**

Universidade Federal de Juiz de Fora

**Dr.<sup>a</sup> Aline Souza Magalhães**

Universidade Federal de Minas Gerais

**Dr. Alexandre Nunes de Almeida**

Universidade de São Paulo

**Dr. Ademir Antônio Moreira Rocha**

## Universidade Federal do Amazonas

Juiz de Fora, 30/06/2026.



Documento assinado eletronicamente por **Weslem Rodrigues Faria, Professor(a)**, em 14/07/2026, às 09:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Nunes de Almeida, Usuário Externo**, em 14/07/2026, às 10:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ademir Antônio Moreira Rocha, Usuário Externo**, em 14/07/2026, às 13:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Admir Antonio Betarelli Junior, Professor(a)**, em 14/07/2026, às 13:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **ALINE SOUZA MAGALHAES, Usuário Externo**, em 15/07/2026, às 12:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Flaviane Souza Santiago, Professor(a)**, em 19/07/2026, às 22:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-Ufjf ([www2.ufjf.br/SEI](http://www2.ufjf.br/SEI)) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **3055866** e o código CRC **71A7CB8D**.

*O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) - processo 141025/2020-4.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todos que, de algum modo, contribuíram para a realização deste trabalho, bem como às instituições que tornaram possível o seu desenvolvimento. Reconheço, ainda, o conjunto de circunstâncias e apoios que, ao longo do percurso, permitiram conduzir esta pesquisa até a sua conclusão.

## RESUMO

A expansão dos bioinsumos agrícolas constitui estratégia central da transição tecnológica da agricultura brasileira, alinhada às diretrizes do Programa Nacional de Bioinsumos (Decreto nº 10.375/2020) e ao novo marco legal estabelecido pela Lei nº 15.070/2024. Apesar da relevância institucional do tema, persiste lacuna analítica relativa à mensuração sistêmica dos efeitos econômicos, setoriais e distributivos dessa política sob diferentes regimes de financiamento fiscal. Esta tese contribui para este debate e tem por objetivo analisar os impactos econômicos da expansão dos setores de biofertilizantes, biodefensivos e biocompostagem na economia brasileira no horizonte 2024–2050. A análise enfatiza o papel das subvenções de produção concedidas aos bioinsumos e suas repercussões macroeconômicas, setoriais e sobre os preços relativos sob distintos cenários de política fiscal. A estratégia metodológica articula duas etapas complementares e sucessivas. Na primeira, estima-se, mediante modelo econométrico de dados em painel com efeitos fixos, a elasticidade da produtividade da terra em relação ao uso de fertilizantes. Por seu turno, na segunda etapa, esse parâmetro estimado é utilizado para calcular choques de produtividade derivados do uso de fertilizantes e biofertilizantes nas soluções de política em um modelo de equilíbrio geral computável de dinâmica-recursiva para a economia brasileira, denominado BIO-BR, que desagrega explicitamente os setores de bioinsumos na matriz produtiva nacional e simula seis cenários de política, organizados em três pares de regime fiscal: orçamento livre, equilíbrio via taxação e equilíbrio via gastos, cada qual avaliado com e sem ganhos de produtividade da terra. Os resultados conclusivos indicam que a expansão dos bioinsumos produziria efeitos macroeconômicos positivos nos cenários de orçamento livre, com desvios acumulados do PIB real entre 0,27% e 0,28% no longo prazo, acompanhados de expansão do investimento, do consumo das famílias, do estoque de capital e do salário real. O cenário de equilíbrio orçamentário via realocação de gastos emerge como alternativa fiscalmente sustentável, preservando efeitos positivos sobre PIB, investimento e competitividade externa. A contribuição da tese articula-se em quatro frentes principais, a saber: instrumental analítico inédito para a avaliação sistêmica da política de bioinsumos no Brasil; compõe a primeira quantificação integrada de seus efeitos macroeconômicos, setoriais e distributivos; aponta a identificação de mecanismo redistributivo via preços dos alimentos; e demonstração da viabilidade de coexistência entre bioinsumos e parque agroquímico convencional.

**Palavras-chave:** Agricultura. Bioinsumos. Insumos químicos. Equilíbrio Geral Computável. Produtividade agrícola.

## ABSTRACT

The expansion of agricultural bioinputs constitutes a central strategy in the technological transition of Brazilian agriculture, aligned with the guidelines of the National Bioinputs Program (Decree No. 10,375/2020) and with the new legal framework established by Law No. 15,070/2024. Despite the institutional relevance of the topic, an analytical gap persists regarding the systemic measurement of the economic, sectoral, and distributional effects of this policy under different fiscal financing regimes. This dissertation aims to analyze, in an integrated manner, the economic impacts of the expansion of the biofertilizer, biopesticide, and biocomposting sectors on the Brazilian economy over the 2024–2050 horizon, with emphasis on the role of the production subsidies granted to bioinputs and on their macroeconomic and sectoral repercussions, as well as their effects on relative prices, under distinct fiscal policy scenarios. The methodological strategy articulates two complementary and successive stages. In the first, the elasticity of land productivity with respect to fertilizer use is estimated by means of a fixed-effects panel-data econometric model. In turn, in the second stage, this estimated parameter is used to compute productivity shocks derived from the use of fertilizers and biofertilizers in the policy solutions of a recursive-dynamic computable general equilibrium model for the Brazilian economy, named BIO-BR, which explicitly disaggregates the bioinput sectors within the national production matrix and simulates six policy scenarios, organized into three pairs of fiscal regimes: free budget, balance via taxation, and balance via expenditure, each evaluated with and without land productivity gains. The main results indicate that the expansion of bioinputs would produce positive macroeconomic effects in the free-budget scenarios, with cumulative deviations in real GDP between 0.27% and 0.28% in the long run, accompanied by an expansion of investment, household consumption, the capital stock, and the real wage. The scenario of budgetary balance via expenditure reallocation emerges as a fiscally sustainable alternative, preserving positive effects on GDP, investment, and external competitiveness. The contribution of this dissertation is articulated along four main fronts, namely: a novel analytical instrument for the systemic assessment of bioinput policy in Brazil; it constitutes the first integrated quantification of its macroeconomic, sectoral, and distributional effects; it points to the identification of a redistributive mechanism operating through food prices; and a demonstration of the feasibility of coexistence between bioinputs and the conventional agrochemical sector.

**Keywords:** Agriculture. Bioinputs. Chemical inputs. Computable General Equilibrium. Agricultural productivity.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                               |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 1 - As principais visões da bioeconomia .....                                                                          | 28  |
| Figura 2 - Evolução do número de empresas com registro de produtos para controle de pragas e doenças .....                    | 34  |
| Figura 3 - Representação esquemática dos eixos temáticos do PNB .....                                                         | 38  |
| Figura 4 - Teoria da Mudança proposta para o PNB .....                                                                        | 40  |
| Figura 5 – Desenho e arquitetura do PNB .....                                                                                 | 41  |
| Figura 6 - Panorama do setor de bioinsumos no Brasil (R\$ bilhões a preços correntes).....                                    | 47  |
| Figura 7 - Estimativa de uso de fertilizantes por área a nível municipal (Ton/hectare), 2017 .....                            | 54  |
| Figura 8 - Principais modelos e desenvolvimento histórico do modelo BIO-BR .....                                              | 70  |
| Figura 9 - Estrutura de produção .....                                                                                        | 86  |
| Figura 10 - Estrutura da demanda por investimentos .....                                                                      | 88  |
| Figura 11 - Estrutura de consumo das famílias.....                                                                            | 90  |
| Figura 12 - Desagregação dos três produtos principais da MIP .....                                                            | 99  |
| Figura 13 - Decomposição dos produtos ligados a bioinsumos .....                                                              | 101 |
| Figura 14 - Mercado nacional de bioinsumos em termos nominais (Mi de R\$), 2015-2023 .....                                    | 103 |
| Figura 15 - Demanda setorial dos insumos químicos e bioinsumos .....                                                          | 104 |
| Figura 16 - Variação produtividade dos bioinsumos, 2015-2024 .....                                                            | 108 |
| Figura 17 - Simulações em modelos EGC dinâmicos.....                                                                          | 110 |
| Figura 18 – Cenários baseline e de política do Modelo BIO-BR, 2023-2050.....                                                  | 113 |
| Figura 19 - Mecanismo de transmissão da política de bioinsumos no Modelo BIO-BR.....                                          | 117 |
| Figura 20 - Trajetória do baseline e meta de política.....                                                                    | 120 |
| Figura 21 - Cálculo do choque adicional de política de subsídios .....                                                        | 122 |
| Figura 22 - Trajetória do PIB real (Var.%) acumulado nos seis cenários .....                                                  | 126 |
| Figura 23 - Trajetória do PIB real (Var.%) considerando os efeitos líquidos finais de cada regime orçamentário .....          | 128 |
| Figura 24 - Trajetória do investimento total e do aluguel médio do capital nos seis cenários .....                            | 130 |
| Figura 25 - Variação acumulada (%) da renda disponível nos seis cenários.....                                                 | 131 |
| Figura 26 - Variação acumulada (%) do consumo real das famílias nos seis cenários .....                                       | 132 |
| Figura 27 - Renda real acumulada (Var.%) entre os seis cenários de política por tipo de família, por horizonte temporal ..... | 133 |
| Figura 28 - Variação acumulada (%) do índice de preços nos seis cenários .....                                                | 135 |
| Figura 29 - Variação acumulada (%) do consumo do governo nos seis cenários .....                                              | 137 |
| Figura 30 - Variação acumulada (%) da renda do governo nos seis cenários .....                                                | 137 |

|                                                                                                                                |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 31 - Trajetória temporal (Var.%) da utilidade por família e por cenário .....                                           | 139 |
| Figura 32 - Variação acumulada (%) no emprego agregado e salário real nos seis cenários .....                                  | 142 |
| Figura 33 - Variação acumulada (%) nas Exportações, importações e termos de troca .....                                        | 143 |
| Figura 34 - Desvios acumulados (Var.%) do nível de atividade (x1tot) dos setores de bioinsumos ...                             | 144 |
| Figura 35 - Trajetória do nível de atividade (Var.%) de setores relacionados à agropecuária .....                              | 145 |
| Figura 36 - Trajetória do nível de atividade (Var.%) de setores relacionados à indústria química .....                         | 146 |
| Figura 37 - Trajetória do nível de atividade (Var.%) de setores relacionados à setores indiretos, por período .....            | 149 |
| Figura 38 - Desvios acumulados (Var.%) do investimento (x2tot) dos setores de bioinsumos por cenário e horizonte temporal..... | 153 |
| Figura 39 - Ciclo de investimento (x2tot) em setores relacionados a agropecuária .....                                         | 155 |
| Figura 40 - Ciclo de investimento (x2tot) em setores relacionados a indústria química .....                                    | 156 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 1 - Média das variáveis adotadas na análise, 2006 e 2017 .....                                                                                                    | 58  |
| Tabela 2 - Estimativas dos parâmetros da função de produtividade, 2006/2017 .....                                                                                        | 60  |
| Tabela 3 - Tipos de famílias segundo as classes de renda familiar .....                                                                                                  | 96  |
| Tabela 4 - Participação (%) dos produtos, 2015 .....                                                                                                                     | 105 |
| Tabela 5 - Participação (%) dos setores de bioinsumos frente aos setores de insumos químicos .....                                                                       | 106 |
| Tabela 6 - Variações reais (%) dos principais indicadores macroeconômicos.....                                                                                           | 111 |
| Tabela 7 - Desvios acumulados (Var. %) da produção por produto, por agregado setorial, cenário e horizonte temporal .....                                                | 151 |
| Tabela 8 - Desvios acumulados (Var. %) da demanda básica por exportação dos setores agrícolas, bioinsumos e cadeias relacionadas, por cenário e horizonte temporal ..... | 159 |

## LISTA DE QUADROS

|                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Quadro 1 - Principais visões da bioeconomia e suas características .....                                          | 22 |
| Quadro 2 - Marcos temporais na agenda de Bioeconomia no Brasil e no mundo.....                                    | 25 |
| Quadro 3 - Registro de produtos de origem biológica e instruções normativas relacionadas .....                    | 30 |
| Quadro 4 - Programa Nacional de Bioinsumos e sua base conceitual .....                                            | 35 |
| Quadro 5 - Variáveis relacionadas à produção agrícola, 2006 e 2017 .....                                          | 56 |
| Quadro 6 - Literatura sobre políticas, estratégias e cenários relacionados com insumos agrícolas usando EGC ..... | 76 |
| Quadro 7 - Setores econômicos do modelo BIO-BR.....                                                               | 94 |
| Quadro 9 - Parâmetros para o módulo de dinâmica recursiva do modelo BIO-BR .....                                  | 98 |

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABBI – Associação Brasileira de Bioinovação

ALCA - Área de Livre Comércio das Américas

ANDA – Associação Nacional para Difusão de Adubos

BIM-T – Brazilian Imperfect Market and Transport

BIRAC – Relatório de Bioeconomia da Índia

B-MARIA - Brazilian Multisectoral Interregional Analysis Model

BRIDGE - Brazilian Integrated Dynamic General Equilibrium

CBAM – Carbon Border Adjustment Mechanism

CGFERT – Comitê Gestor de Fertilizantes

CPND – Contribuições Pretendidas Nacionalmente Determinadas

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

EPA – Environmental Protection Agency

EUETS – European Union Emissions Trading System

FAO – Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura

IA – Ingrediente Ativo

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change

IPM – Integrated Pest Management (Manejo Integrado de Pragas)

LES – Linear Expenditure System

LMR – Limite Máximo de Resíduos

MIBRA - Inter-regional Applied General Equilibrium Model for the Brazilian Economy

MONASH – Modelo dinâmico de EGC desenvolvido no Centre of Policy Studies

NPK – Nitrogênio, Fósforo e Potássio

ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

ORANI – Modelo estático de EGC da economia australiana

PAPA - Policy Analysis with Partial Adjustment

PNB – Programa Nacional de Bioinsumos

PNF – Plano Nacional de Fertilizantes

PNPB – Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel

PROFERT – Programa de Desenvolvimento da Indústria de Fertilizantes

SPARTA - Single-country Policy Analysis of Regional Trade Applications

## SUMÁRIO

|            |                                                                                      |            |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>1</b>   | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                                              | <b>16</b>  |
| <b>2</b>   | <b>ASPECTOS INSTITUCIONAIS E ECONOMICOS .....</b>                                    | <b>21</b>  |
| <b>2.1</b> | <b>MARCO TEÓRICO DA BIOECONOMIA E OS BIOINSUMOS .....</b>                            | <b>21</b>  |
| 2.2        | EVOLUÇÃO NORMATIVA DO SETOR DE BIOINSUMOS NO BRASIL.....                             | 27         |
| 2.3        | DA REVOLUÇÃO VERDE À TRANSIÇÃO PARA OS BIOINSUMOS .....                              | 32         |
| 2.4        | PROGRAMA NACIONAL DE BIOINSUMOS .....                                                | 34         |
| 2.5        | PLANO NACIONAL DE FERTILIZANTES .....                                                | 42         |
| 2.6        | PERSPECTIVAS DO MERCADO DE BIOINSUMOS NO BRASIL E NO MUNDO .....                     | 46         |
| <b>3</b>   | <b>PRODUÇÃO AGRÍCOLA E INSUMOS QUÍMICOS: EVIDÊNCIAS ECONÔMICAS E APLICAÇÕES.....</b> | <b>51</b>  |
| 3.1        | METODOLOGIA DA ESTIMATIVA ECONÔMICA .....                                            | 51         |
| 3.2        | BASE DE DADOS .....                                                                  | 53         |
| 3.3        | RESULTADOS .....                                                                     | 59         |
| <b>4</b>   | <b>MODELO BIO-BR .....</b>                                                           | <b>64</b>  |
| 4.1        | MODELOS DE EGC E CARACTERÍSTICAS GERAIS DO MODELO BIO-BR.....                        | 66         |
| 4.2        | ESTUDOS APLICADOS À INSUMOS AGRÍCOLAS COM MODELOS DE EGC E EQUILÍBRIO PARCIAL .....  | 71         |
| 4.3        | DINÂMICA RECURSIVA.....                                                              | 81         |
| 4.4        | ESTRUTURA TEÓRICA DO MODELO BIO-BR .....                                             | 84         |
| 4.5        | ESTRUTURA DOS DADOS E PARÂMETROS DO MODELO .....                                     | 93         |
| 4.6        | ABERTURA DOS SETORES E INSERÇÃO DOS BIOINSUMOS NA MIP.....                           | 99         |
| 4.7        | CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO .....                                                          | 109        |
| <b>5</b>   | <b>ANÁLISE DOS EFEITOS DE POLÍTICAS .....</b>                                        | <b>125</b> |
| 5.1        | RESULTADOS MACROECONÔMICOS.....                                                      | 125        |
| 5.2        | RESULTADOS SETORIAIS .....                                                           | 143        |
| <b>6</b>   | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>                                                    | <b>160</b> |
| <b>7</b>   | <b>REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO .....</b>                                               | <b>165</b> |

|                                                                                                                            |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| APÊNDICE A – VARIÁVEIS DO MODELO BIO-BR E TIPO DE FECHAMENTO .....                                                         | 197 |
| APÊNDICE B – DESCRIÇÃO DOS CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO PARA O SETOR DE BIOINSUMOS..                                              | 198 |
| APÊNDICE C – CONTRIBUIÇÃO PARA O PIB PELO LADO DA DESPESA, POR CENÁRIO E HORIZONTE.....                                    | 199 |
| APÊNDICE D – CONTRIBUIÇÃO PARA O PIB PELO LADO DA RENDA, POR CENÁRIO E HORIZONTE<br>200                                    |     |
| APÊNDICE E – DETALHAMENTO DO SETOR DE DEFENSIVOS BIOLÓGICOS (BIODEFENSIVOS)..                                              | 201 |
| APÊNDICE F– DETALHAMENTO DO SETOR DE DEFENSIVOS QUÍMICOS (AGROTÓXICOS).....                                                | 202 |
| APÊNDICE G – DETALHAMENTO DO SETOR DE FERTILIZANTES QUÍMICOS.....                                                          | 203 |
| APÊNDICE H – MERCADO NACIONAL DE BIOINSUMOS EM VALORES CORRENTES (R\$) .....                                               | 204 |
| APÊNDICE I - DESVIOS ACUMULADOS (%) DO NÍVEL DE ATIVIDADE (X1TOT) POR SETOR, CENÁRIO E HORIZONTE TEMPORAL (CONTINUA) ..... | 205 |
| ANEXO A – DESCRIÇÃO DOS PRODUTOS DA LAVOURA PERMANENTE E DA LAVOURA TEMPORÁRIA .....                                       | 207 |
| ANEXO B - DECLARAÇÃO DE USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL GENERATIVA (IAG) .....                                              | 208 |

## 1 INTRODUÇÃO

A crise ambiental contemporânea, caracterizada por mudanças climáticas, perda de biodiversidade e degradação dos recursos naturais, tem colocado em xeque os modelos tradicionais de produção agrícola baseados no uso intensivo de insumos químicos sintéticos (Rockström *et al.*, 2009; Foley *et al.*, 2011). Nesse cenário, o debate sobre alternativas mais sustentáveis tem ganhado força em todo o mundo, particularmente no que se refere à transição para práticas agrícolas de menor impacto ambiental e maior eficiência ecológica (Pretty, 2008; HLPE, 2019), entendida como a capacidade dos sistemas produtivos de maximizar a produção agrícola ao mesmo tempo em que minimizam o uso de recursos naturais e a geração de impactos ambientais adversos (Lundahl, 1987; Kicherer *et al.*, 2007; Fang, 2015; Wang *et al.*, 2022). No Brasil, país reconhecido por sua relevância como grande exportador de *commodities* agrícolas, a busca por inovação em insumos e tecnologias agrícolas representa não apenas uma resposta à demanda por sustentabilidade, mas também uma estratégia para fortalecer a competitividade em mercados internacionais crescentemente exigentes (OECD/FAO, 2021; Embrapa, 2022a).

Embora a ampla difusão e comercialização de insumos químicos a partir de meados do século XX tenham viabilizado um aumento sem precedentes da produtividade agrícola em escala global (Martínez-Dalmau *et al.*, 2021), no Brasil esse processo assumiu contornos particularmente expressivos. Desde a década de 1970 até 2023, a produção agrícola nacional cresceu cerca de seis vezes, enquanto a área cultivada se expandiu aproximadamente 2,4 vezes, resultando em um dos maiores ganhos de produtividade total dos fatores (PTF) observados no mundo (Masshurá *et al.*, 2024). No entanto, o uso intensivo desses insumos convencionais tem sido acompanhado pela geração de diversas externalidades negativas de ordem ambiental, social e econômica. Entre elas destacam-se a degradação dos solos (Zhang *et al.*, 2020; Wu *et al.*, 2020), a elevação das emissões de gases de efeito estufa (GEE) (Raucci *et al.*, 2015; Hickman *et al.*, 2021), a contaminação de corpos hídricos (Martínez-Dalmau *et al.*, 2021), além dos impactos adversos sobre a fauna silvestre (Tosi *et al.*, 2022; Köhler *et al.*, 2013; Story e Cox, 2001) e sobre a saúde humana (Kim *et al.*, 2019; Sarwar, 2021; Dias e Soares, 2023).

A manutenção do modelo produtivo tradicional, sustentado pelo uso predominante de insumos químicos, representa um risco crescente para a competitividade internacional da agricultura, podendo levar à perda de mercados para as exportações do setor. Trata-se, pois, de um desafio econômico, especialmente considerando o número crescente de regiões e países que impuseram normas de segurança mais rigorosas às importações agrícolas (CEPAL, FAO e

IICA, 2021). Além disso, a agricultura permanece fortemente dependente dos insumos químicos, cuja oferta é majoritariamente importada, tornando o setor vulnerável às oscilações do mercado internacional. Em 2023, a razão importação/consumo do complexo NPK superou 90% (FAO, 2023), e as importações de fertilizantes geraram, em 2024, um déficit comercial próximo de US\$ 13,2 bilhões (SECEX, 2024). Essa dependência externa eleva custos de produção, respondendo em média por 23% do custo total em soja, milho e algodão (Conab, 2024), aumenta a exposição a choques geopolíticos e limita a autonomia produtiva do país.

É nesse contexto que os bioinsumos, que são produtos de origem biológica e/ou orgânica destinados ao controle de pragas, promoção de crescimento vegetal ou melhoria da fertilidade do solo, ganham destaque como ferramenta-chave para a reconfiguração da base tecnológica da agricultura brasileira (Hungria; Mendes; Mercante, 2013; Brasil, 2020). O uso deste tipo de insumo vem crescendo de forma expressiva, impulsionado por políticas públicas, avanços regulatórios, dinâmicas de mercado e mudanças no comportamento dos produtores (Vidal; Dias, 2023; Sambuichi *et al.*, 2024). Além disso, o desenvolvimento do setor de bioinsumos pode contribuir para o reposicionamento do Brasil como fornecedor global de alimentos com menor pegada ecológica<sup>1</sup>, consolidando-se como parte de uma estratégia nacional de agricultura sustentável (Embrapa, 2022a; FGV, 2024).

O setor de bioinsumos tem registrado um avanço expressivo tanto no cenário internacional quanto no Brasil. O mercado mundial de bioinsumos foi estimado, em 2023, entre 13 e 15 bilhões de dólares, incluindo categorias como controle biológico, inoculantes, bioestimulantes e solubilizadores. As estimativas apontam para uma taxa de crescimento anual entre 13% e 14% até 2032, o que pode elevar o valor total do mercado para aproximadamente 45 bilhões de dólares, o triplo do valor estimado para 2023. Dentre os segmentos, o de controle biológico lidera, representando cerca de 57% do mercado global, e deve manter essa posição dominante nos próximos anos. Esse desempenho está sendo impulsionado por uma expectativa de maior uso desses produtos em culturas de larga escala, especialmente em países como Estados Unidos e membros da União Europeia, que vêm seguindo a tendência já consolidada no Brasil, que é um dos países com maior índice de adoção desses insumos no mundo (Croplife Brasil, 2024).

---

<sup>1</sup> A pegada ecológica é uma metodologia de contabilidade ambiental que avalia o impacto do consumo sobre os recursos naturais (WWF-Brasil, 2025)

No contexto brasileiro, o mercado movimentou cerca de R\$ 5 bilhões na safra 2023/2024, um incremento de 15% em relação ao período anterior. Nos últimos três anos, a taxa média de crescimento anual no país foi de 21%, valor significativamente acima da média mundial. Durante a safra 2022/2023, a área agrícola tratada com bioinsumos aumentou mais de 35%, alcançando 12% da área total cultivada. Soja, milho, cana-de-açúcar, algodão, café, citrus e hortaliças concentram a maior parte desse uso, com destaque para a soja, que sozinha representa 55% da demanda (Cropplife Brasil, 2024). Segundo o Censo Agropecuário (IBGE, 2017), entre os 2,1 milhões de estabelecimentos que realizaram adubação, 47% utilizaram apenas insumos químicos, 28% apenas orgânicos e 25% ambos, de modo que a adubação química alcança cerca de 72% desses estabelecimentos.

A avaliação sistêmica dos impactos econômicos e produtivos da ampliação do uso de bioinsumos necessita de uma modelagem analítica que considere de forma abrangente a transmissão dos efeitos pelos canais diretos e indiretos nos vínculos de produção e consumo de um sistema econômico. Por tratar dos canais intersetoriais de um determinado sistema econômico, modelos de equilíbrio geral computável (EGC) podem tratar dessa complexidade ao projetar as repercussões econômicas da transição para maior uso de bioinsumos, conforme postula as diretrizes do Programa Nacional de Bioinsumos (Brasil, 2020). A análise dessa política de transição tecnológica pode ser ainda avaliada em relação ao caminho tendencial de uma economia (*business-as-usual*), fornecendo efeitos acumulados em uma trajetória temporal previamente estabelecida. A preocupação reside na necessidade de tratar a dimensão tempo nas soluções de EGC a fim de oferecer uma perspectiva de curto, médio e longo prazo dos indicadores setoriais e macroeconômicos.

No entanto, embora existam estudos sobre sua eficiência técnica (Bettiol *et al.*, 2019; Bueno *et al.*, 2020; Mapa, 2022; Mapa, 2024), são escassas as análises quantitativas que mensuram seus impactos econômicos de maneira abrangente (Embrapa, 2022b; Sambuichi *et al.*, 2024). Esta Tese se alinha às diretrizes do Programa Nacional de Bioinsumos, instituído em 2020 por decreto nº 10.375 e reforçado pela Lei 15.070/2024 (novo marco regulatório para bioinsumos no Brasil). A lei consolida uma norma específica para a produção, registro, comercialização e uso de insumos biológicos, incluindo biofertilizantes, agentes de controle biológico e inoculantes, com incentivos ao desenvolvimento de biofábricas e à adoção de práticas sustentáveis no campo. Essa iniciativa legal inscreve-se em um contexto mais amplo de diversas propostas regulatórias e políticas públicas que sinalizam na direção da expansão de estímulos aos bioinsumos como instrumento central para o incremento da oferta desses produtos

no Brasil. Nessa perspectiva, este estudo pretende contribuir para o debate em curso ao oferecer uma avaliação quantitativa dos impactos econômicos dos subsídios aos bioinsumos no Brasil, considerando diferentes arranjos fiscais e na presença ou ausência de produtividade da terra, fatores que condicionam tanto a magnitude quanto a distribuição setorial desses efeitos sobre a economia.

Desse modo, o objetivo central desta Tese é avaliar, de forma integrada, os impactos econômicos da expansão dos subsídios aos bioinsumos sobre a economia brasileira, simulando essa política sob diferentes arranjos fiscais. Especificamente, foram analisados três cenários contrastantes: um em que o orçamento público permanece livre (sem restrição de receita), um segundo em que o orçamento é equilibrado mediante aumento de tributação, e um terceiro em que o equilíbrio fiscal é obtido por meio de realocação de gastos públicos. Esta decomposição permitiu compreender não apenas a magnitude dos impactos macroeconômicos e setoriais, mas também os efeitos distributivos resultantes de cada opção de financiamento, reconhecendo que a forma como os subsídios são financiados condiciona profundamente a incidência dos ganhos e das perdas entre setores e grupos de renda. Para responder a esse problema aplicado para a economia brasileira, esta Tese adota uma estratégia metodológica composta por duas etapas sucessivas e complementares, que combina um modelo econométrico e um modelo de equilíbrio geral computável (EGC), explorando as vantagens analíticas de cada abordagem.

A primeira etapa utiliza um modelo econométrico para estimar empiricamente as relações entre o uso de fertilizantes e a produtividade da terra. Do modelo econométrico deriva-se os impactos diretos dos fertilizantes sobre a produtividade da terra, ou seja, um parâmetro de elasticidade da produtividade da terra em relação ao uso de fertilizantes agrícolas. Este parâmetro é, por conseguinte, utilizado em novas equações na estrutura matemática de um modelo de equilíbrio geral computável, isto é, a segunda etapa da estratégia metodológica.

Salienta-se que, embora a literatura internacional tenha avançado na avaliação dos impactos de políticas ambientais e de insumos agrícolas sobre produção, renda e bem-estar econômico, grande parte desses estudos utiliza modelos de equilíbrio geral estáticos ou modelos parciais, frequentemente aplicados a economias europeias ou a análises comparativas internacionais (Bellora e Bureau, 2014; Simola, 2015). Em particular, trabalhos associados às estratégias de transição sustentável da agricultura concentram-se majoritariamente nos efeitos do uso da terra (Chalise & Naranpanawa, 2016), na redução de fertilizantes e agrotóxicos (Frandsen & Jacobsen, 2002; Bartelings *et al*, 2016; Boulanger *et al*, 2017; Beckman, Ivanic e Jelliffe, 2021) ou na avaliação de políticas climáticas (Frandsen, Hansen e Trier, 1996;

Dissanayake *et al* 2017; Wang, 2022), sem incorporar de forma explícita o papel dos bioinsumos como vetor tecnológico alternativo. No caso brasileiro, os estudos existentes tendem a empregar abordagens econométricas focadas em produtividade agrícola ou adoção tecnológica (De Negri e Cavalvante, 2014; Lázari e Magalhães, 2019; Gasquez *et al*, 2022), não havendo, até onde se tem conhecimento, artigos que utilizem uma associação entre econometria e modelo EGC dinâmico aplicado à economia brasileira para avaliar especificamente os efeitos de políticas de subsídios ao setor de bioinsumos e seus efeitos econômicos, setoriais e distributivos.

A Tese está organizada em sete capítulos. O Capítulo 1 é composto por esta introdução que apresentou a motivação do estudo, a problemática, os objetivos, a justificativa e a estrutura do trabalho. O Capítulo 2 discute os aspectos institucionais e econômicos dos bioinsumos, analisando a evolução normativa e as principais políticas públicas, da Revolução Verde à atual agenda agroambiental. O Capítulo 3 trata da relação entre produtividade agrícola e uso de insumos, com uma análise econométrica da sensibilidade da produção ao uso de fertilizantes convencionais.

O Capítulo 4 detalha aspectos específicos do Modelo BIO-BR, incluindo os fundamentos teóricos da modelagem EGC, a construção da base de dados e o processo de calibração do modelo. O Capítulo 5 são apresentados os resultados macroeconômicos, setoriais e distributivos do modelo. O Capítulo 6, são discutidas as principais conclusões, os limites e as potencialidades da pesquisa, além de sugestões para investigações futuras. Por fim, o Capítulo 7 reúne as referências bibliográficas utilizadas ao longo do trabalho.

## **2 ASPECTOS INSTITUCIONAIS E ECONOMICOS**

O presente capítulo tem por objetivo examinar os principais marcos institucionais e econômicos que moldaram o desenvolvimento do setor de bioinsumos no Brasil. Ao longo das últimas décadas, o país vivenciou transformações em sua matriz tecnológica agrícola, marcadas inicialmente pela difusão intensiva de insumos químicos durante a Revolução Verde e, mais recentemente, pela emergência de uma nova agenda voltada à transição agroecológica, moldando o que definimos como bioeconomia. Neste contexto, será apresentada inicialmente os fundamentos conceituais dos termos ligados a bioeconomia e bioinsumos, seguido pela trajetória normativa que ampara o uso e a produção no Brasil, destacando os avanços legais, as políticas públicas e os mecanismos de regulação que conferem suporte institucional ao setor. Também será abordado o papel estratégico do Programa Nacional de Bioinsumos (PNB), instituído como resposta às demandas por práticas agrícolas mais “limpas”, e analisado o contexto econômico que tem impulsionado a adoção dessas tecnologias no país. A articulação entre esses elementos permite compreender como o Brasil vem estruturando as bases para consolidar um novo paradigma na agricultura, pautado por inovação, competitividade e meio ambiente.

### **2.1 Marco teórico da bioeconomia e os bioinsumos**

A perspectiva bioeconômica inaugurada por Georgescu-Roegen (1971) constitui uma inflexão fundamental no pensamento econômico ao integrar, de forma explícita, as bases físicas e biológicas que condicionam os sistemas produtivos. Seu marco teórico destaca que a economia opera dentro dos limites da biosfera e é regida por processos irreversíveis de transformação energética, o que desloca o foco da acumulação ilimitada para a gestão qualitativa dos recursos naturais. Essa abordagem inaugura uma leitura biofísica da economia que influenciou agendas posteriores ligadas ao desenvolvimento sustentável, à economia ecológica e, mais recentemente, à bioeconomia.

No debate contemporâneo, a bioeconomia passa a ser compreendida como um sistema produtivo que busca reconciliar crescimento econômico, eficiência energética e conservação dos recursos naturais, privilegiando modelos baseados em biomassa sustentável, inovação biotecnológica e redução de impactos ambientais (FAO, 2021; OECD, 2018). Assim, o pensamento de Georgescu-Roegen (1971) oferece o fundamento conceitual para compreender

a bioeconomia não apenas como um setor emergente, mas como uma transformação estrutural que conecta limites ecológicos, processos produtivos e políticas públicas de longo prazo.

A literatura especializada mostra que o conceito de bioeconomia surgiu em diferentes contextos e ganhou múltiplas interpretações conforme avançou em distintos campos científicos (Staffas *et al*, 2013; Pollack, 2012). Diante dessa diversidade, autores têm buscado organizar essas visões (Quadro 1) em tipos ideais que ajudam a compreender como o termo é empregado. De modo geral, três perspectivas principais se destacam nos estudos, cada uma enfatizando dimensões específicas do uso de recursos biológicos e do papel da ciência e da tecnologia nesse processo.

**Quadro 1 - Principais visões da bioeconomia e suas características**

|                                         | <b>Visão da Biotecnologia</b>                                                                                                              | <b>Visão dos Biorrecursos</b>                                                                                                                                                                                                        | <b>Visão Bioecológica</b>                                                                                                                                                                                                      |
|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Objetivos</b>                        | Crescimento econômico e geração de empregos                                                                                                | Crescimento econômico e sustentabilidade                                                                                                                                                                                             | Sustentabilidade, biodiversidade, conservação de ecossistemas e prevenção da degradação do solo                                                                                                                                |
| <b>Geração de valor</b>                 | Aplicação da biotecnologia, comercialização de pesquisas e tecnologias                                                                     | Conversão e valorização de biorrecursos (orientada a processos)                                                                                                                                                                      | Desenvolvimento de sistemas produtivos integrados e produtos de alta qualidade com identidade territorial                                                                                                                      |
| <b>Vetores e mediadores de inovação</b> | P&D, patentes, escritórios de transferência de tecnologia (TTOs), conselhos e financiadores de pesquisa (modelo linear baseado na ciência) | Interdisciplinaridade, otimização do uso da terra, inclusão de áreas degradadas na produção de biocombustíveis, uso e disponibilidade de biorrecursos, gestão de resíduos, engenharia, ciência e mercado (modo interativo e em rede) | Identificação de práticas agroecológicas favoráveis, ética, risco, sustentabilidade transdisciplinar, interações ecológicas, reutilização e reciclagem de resíduos, uso da terra (modo de produção circular e autossustentado) |
| <b>Foco espacial</b>                    | Clusters globais e regiões centrais                                                                                                        | Regiões rurais e periféricas                                                                                                                                                                                                         | Regiões rurais e periféricas                                                                                                                                                                                                   |

Fonte: Adaptado de Bugge *et al* (2016).

A primeira é uma abordagem centrada na biotecnologia, que entende a bioeconomia como resultado da expansão de técnicas biotecnológicas aplicadas e comercializadas em variados setores produtivos (Morrison *et al*, 2012). Em paralelo, uma segunda vertente prioriza

a gestão e o aproveitamento de recursos biológicos, valorizando atividades de pesquisa, desenvolvimento e demonstração voltadas à produção agrícola, florestal, marinha e energética (Hansen, 2011). Enquanto a visão biotecnológica parte da capacidade de aplicação de novos conhecimentos científicos, a perspectiva baseada em biorrecursos destaca o potencial de transformação e agregação de valor às matérias-primas de origem biológica (Bush; 1945; Zilberman, 2013; Hansen; 2011). A terceira leitura propõe uma bioeconomia orientada por princípios ecológicos, defendendo sistemas produtivos que conservem nutrientes e energia, fortaleçam a biodiversidade e reduzam práticas nocivas como monoculturas e o empobrecimento do solo. Diferentemente das duas abordagens mais tecnológicas e alinhadas a cadeias globais de inovação, essa visão enfatiza soluções integradas e circulares em escala regional, buscando harmonizar produção, ambiente e sustentabilidade. (Wield *et al*, 2013)

Embora sejam apresentadas como três perspectivas distintas, essas abordagens da bioeconomia não devem ser entendidas como compartimentos isolados. Na prática, elas funcionam como modelos ideais que ajudam a organizar diferentes interpretações presentes no debate. Certas instituições tendem a se alinhar mais fortemente a uma das visões (como a OCDE à orientação biotecnológica, a Comissão Europeia à abordagem baseada em biorrecursos, e a plataforma TP Organics à vertente bioecológica), mas isso não impede que esses entendimentos se influenciem mutuamente. (Levidow *et al*, 2013; Staffas *et al*, 2013)

A visão biotecnológica da bioeconomia enfatiza sobretudo crescimento econômico e geração de empregos, colocando a sustentabilidade ambiental em posição secundária (Staffas; Gustavsson; McCormick, 2013). Os efeitos indiretos e riscos éticos são frequentemente minimizados, enquanto a valorização econômica decorre da aplicação de biotecnologias em múltiplos setores e da comercialização de pesquisa e inovação (Hilgartner, 2007; Morrison; Cornips, 2012). Essa perspectiva se apoia em um modelo linear de inovação, no qual a pesquisa científica gera produtos, processos e mercados, demandando forte articulação entre universidades, empresas e fundos de investimento (Bush, 1945; Zilberman *et al.*, 2013). A biotecnologia é vista como capaz de transformar biomassa em ampla variedade de produtos, com processos desenhados para minimizar resíduos (Hansen, 2011). Consequentemente, regiões com forte base científica, presença de *startups* e capital de risco tendem a concentrar os benefícios econômicos globais (Cooke, 2007). Assim, o avanço da bioeconomia depende fortemente do financiamento público e privado à pesquisa, bem como da governança da inovação (Aguilar; Magnien; Thomas, 2013).

Já a orientação ligada a biorecursos aposta que a transformação de matérias-primas biológicas pode gerar crescimento econômico e, ao mesmo tempo, avanços ambientais, embora a sustentabilidade seja frequentemente tratada de forma secundária (Levidow, 2013). O foco principal recai sobre inovação tecnológica e criação de novos produtos, enquanto avaliações sobre impactos climáticos, uso da terra e perda de biodiversidade são pouco aprofundadas. Nessa perspectiva, a eficiência no aproveitamento da biomassa (incluindo resíduos orgânicos convertidos em energia ou bioinsumos) torna-se central, especialmente por meio do uso em cascata (Duchesne *et al*, 2003). A inovação depende de pesquisas interdisciplinares e de cooperação entre setores como agricultura, energia e indústria. Além disso, acredita-se que novas cadeias bioeconômicas possam impulsionar o desenvolvimento rural ao agregar valor localmente, ainda que parte do conhecimento necessário permaneça concentrado fora desses territórios (Staffas *et al*, 2013; Pfau *et al*, 2014).

A perspectiva bioecológica coloca a sustentabilidade socioambiental no centro, em contraste com as abordagens biotecnológica e biorrecursos, que tendem a priorizar ganhos econômicos (FAO, 2021). Essa visão enfatiza a valorização da biodiversidade, a conservação dos ecossistemas e o uso de resíduos em sistemas produtivos circulares (Escalante *et al.*, 2022; FAO, 2021). Defende práticas agroecológicas, reaproveitamento de resíduos e técnicas de engenharia ecológica que reduzam a dependência de insumos químicos (Altieri; Nicholls, 2021). Tecnologias como organismos geneticamente modificados são rejeitadas, e há forte ênfase em pesquisas transdisciplinares comprometidas com justiça socioambiental (Levidow; Pimbert; Vanloon, 2014). Por fim, essa visão privilegia economias locais e sistemas agroecológicos territoriais, reforçando oportunidades para cadeias produtivas sustentáveis baseadas em identidade territorial (Altieri; Nicholls, 2021; FAO, 2021).

Segundo a Embrapa (2021a), embora o termo bioeconomia seja relativamente recente no Brasil, suas práticas já se manifestavam desde a década de 1970 (Quadro 2), com a criação do Programa Nacional do Álcool (Proálcool). Essa iniciativa, concebida como resposta à crise do petróleo, posicionou o Brasil como um dos principais produtores e exportadores de etanol do mundo. No entanto, a bioeconomia contemporânea se diferencia por seu caráter mais abrangente e sofisticado, impulsionada por avanços em áreas como biotecnologia industrial, genômica, bioinformática, nanotecnologia e química de renováveis. Atualmente, ela abarca desde bioenergia e biocombustíveis até bioinsumos, plásticos biodegradáveis, cosméticos, medicamentos e alimentos funcionais, entre outros (Embrapa, 2021b).

## Quadro 2 - Marcos temporais na agenda de Bioeconomia no Brasil e no mundo

| Evolução da Agenda de Bioeconomia no Brasil e Mundo                                                        |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1975 – Próálcool                                                                                           |
| 1992 – Rio 92                                                                                              |
| 1998 – Ratificação da Convenção sobre Diversidade Biológica                                                |
| 2000 – Programa Nacional de Florestas                                                                      |
| 2002 – Política Nacional da Biodiversidade                                                                 |
| 2007 – Política Nacional de Desenvolvimento Sustentável dos Povos e Comunidades Tradicionais               |
| 2009 – Plano de Promoção das Cadeias da Sociobiodiversidade                                                |
| 2009 – Plano Nacional de Mudança do Clima                                                                  |
| 2012 – Rio+20                                                                                              |
| 2015 – Lei da Biodiversidade Brasileira                                                                    |
| 2015 – Agenda 2030 e ODS                                                                                   |
| 2015 – Acordo de Paris – COP 21                                                                            |
| 2015 – Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB)                                             |
| 2017 – Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio)                                                    |
| 2019 – Programa Bioeconomia Brasil – MAPA                                                                  |
| 2020 – Lançamento do Programa Nacional de Bioinsumos                                                       |
| 2021 – Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais                                              |
| 2023 – Estabelecimento da Secretaria Nacional de Bioeconomia – MMA                                         |
| 2023 – Plano de Transformação Ecológica - Eixo 3 Bioeconomia e Sistemas Agroalimentares                    |
| 2023 – Novo Programa de Aceleração do Crescimento (PAC) - Eixo de Bioeconomia                              |
| 2024 – Nova Indústria Brasil - Missão 5: Bioeconomia, descarbonização, e transição e segurança energéticas |
| 2024 – Decreto que estabelece a Estratégia Nacional de Bioeconomia                                         |
| 2024 – Iniciativa da Bioeconomia no G20                                                                    |
| 2025 – Conferência das Nações Unidas sobre Mudança do Clima - COP 30                                       |
| 2026 – Plano Nacional de Desenvolvimento da Bioeconomia (PNDBio)                                           |
| 2026 – Regulamentação da Lei nº 15.070 conhecida como Lei dos Bioinsumos (ainda sendo aguardada)           |

Fonte: Adaptado de Sambuichi *et al.*, 2024

O potencial da bioeconomia em sua vertente bioecológica no Brasil é amplamente reconhecida, dada sua condição de país com grande riqueza biodiversa, com mais de 100 mil espécies animais e aproximadamente 45 mil espécies vegetais conhecidas (Embrapa, 2021a). A biodiversidade, quando caracterizada e explorada de forma racional, representa um ativo estratégico que pode impulsionar cadeias produtivas sustentáveis, fortalecer o papel da agricultura na geração de bioprodutos e agregar valor aos recursos naturais nacionais (OCDE, 2009; Embrapa, 2021a).

De acordo com a OCDE (2019), a bioeconomia movimentará cerca de 2 trilhões de euros no mercado global, empregando mais de 22 milhões de pessoas. Estima-se que, até 2030, esse setor corresponderá a 2,7% do PIB dos países membros da organização, percentual que pode ser ainda maior em países como o Brasil, especialmente se houver políticas públicas robustas e integradas para o fortalecimento das cadeias baseadas no uso sustentável da biodiversidade.

Além disso, as atividades da bioeconomia estão fortemente associadas a pelo menos metade dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 da ONU. Isso inclui desde segurança alimentar e energética até saúde pública, geração de emprego e mitigação das mudanças climáticas. A bioeconomia, portanto, é entendida não apenas como uma agenda econômica, mas também como uma estratégia de desenvolvimento integrada e transformadora, capaz de articular inovação tecnológica, inclusão social e conservação ambiental (Vargas; Pinto; Lima, 2022).

A Embrapa (2021a) incorporou a bioeconomia como um dos eixos estratégicos de seu VII Plano Diretor (PDE VII, 2020). Entre suas metas até 2030, destaca-se o compromisso de oferecer novas matérias-primas renováveis, promover a adoção de bioinsumos e bioativos oriundos da biodiversidade brasileira e reduzir a dependência de produtos de origem fóssil por meio do desenvolvimento de soluções biotecnológicas e bioprodutos com aplicação agrícola e industrial.

Nesse contexto, destaca-se a importância dos bioinsumos como um dos principais pilares da bioeconomia. Os bioinsumos envolvem o uso de organismos vivos ou de seus derivados (micro-organismos, extratos naturais, enzimas, entre outros) na produção agropecuária, com aplicações que vão desde o controle biológico de pragas até a promoção do crescimento vegetal e a melhoria da saúde do solo. Ao substituir ou complementar os insumos sintéticos convencionais, os bioinsumos contribuem para a construção de sistemas agroalimentares mais resilientes (Brasil, 2020; Hungria; Mendes; Mercante, 2013).

No Brasil, o setor de bioinsumos vem se expandindo nos últimos anos, tanto em volume de produção quanto em diversidade de aplicações. A criação do Programa Nacional de Bioinsumos (PNB) pelo Decreto nº 10.375/2020 reforça esse movimento (como evidenciado na Figura 1), ao estabelecer diretrizes para fomentar a produção, o registro e o uso desses insumos no território nacional. A multifuncionalidade da agricultura brasileira (capaz de produzir alimentos, fibras, energia e serviços ecossistêmicos) posiciona o país como um ator estratégico na bioeconomia global. Isso exige, contudo, um esforço coordenado de

investimentos, políticas públicas e articulação intersetorial para transformar o potencial biológico em valor econômico e social sustentável (Vargas; Pinto; Lima, 2022).

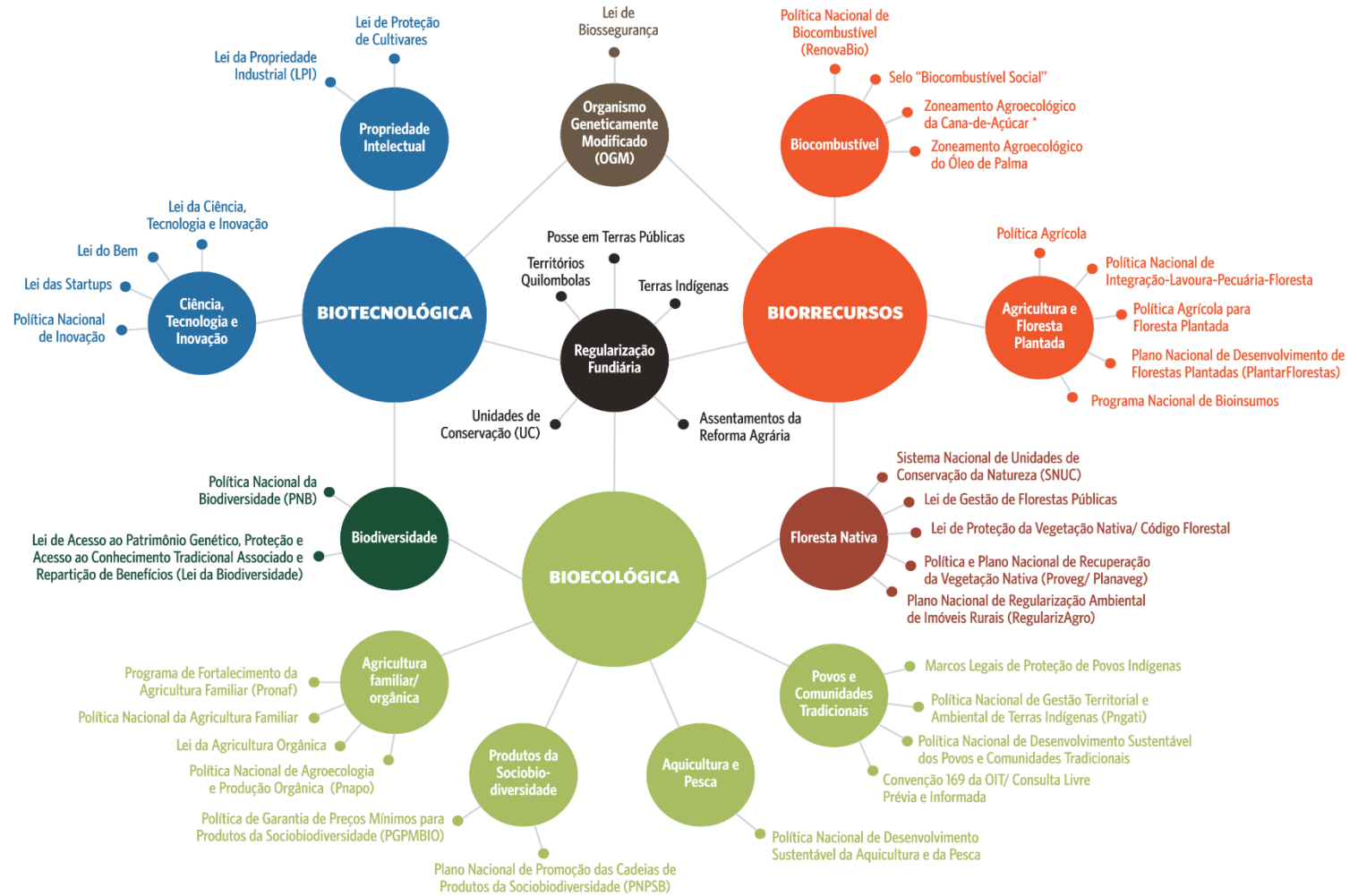
Nesta Tese, o termo bioeconomia será utilizado como referência conceitual para abarcar especificamente o eixo dos bioinsumos, considerados aqui como instrumentos-chave de análise dos setores de biofertilizantes, biodefensivos e de biocompostagem, que serão detalhados à frente. Ao delimitar esse foco, reconhece-se a presença de uma vasta discussão quanto as visões de bioeconomia, contudo busca-se aprofundar a análise sobre a inserção e a contribuição dos bioinsumos de forma específica para a economia do país, assim como seus desdobramentos distributivos e setoriais.

## **2.2 Evolução Normativa do Setor de Bioinsumos no Brasil**

A trajetória normativa dos bioinsumos no Brasil começou com dispositivos legais voltados à regulação de fertilizantes e agrotóxicos. O marco inicial (Brasil, 1980), estabeleceu diretrizes para a inspeção e fiscalização das atividades de produção e comercialização de insumos agrícolas, incluindo fertilizantes, corretivos, inoculantes, estimulantes e biofertilizantes. Nessa legislação, os bioinsumos voltados à nutrição das plantas foram incorporados de forma geral, sem diferenciação entre insumos de origem química e biológica, o que refletia o estágio inicial do reconhecimento desses produtos na política agrícola do país.

No que se refere aos bioinsumos utilizados para fins fitossanitários, sua regulamentação foi inicialmente incorporada pela conhecida Lei dos Agrotóxicos (Brasil, 1989). Essa legislação definiu que tanto os produtos químicos quanto os biológicos, desde que utilizados para controlar pragas ou doenças nas atividades agrícolas, pastoris, florestais ou em outros ecossistemas, deveriam ser submetidos às mesmas normas de registro, controle e fiscalização. A lei considerava como agrotóxicos todos os agentes capazes de alterar a composição da flora ou da fauna com o objetivo de proteger a produção contra organismos considerados nocivos. Com isso, os bioinsumos passaram a ser enquadrados no mesmo regime regulatório dos insumos sintéticos, sem distinções específicas quanto às suas particularidades biológicas e ambientais. Contudo, com o passar do tempo, surgiram normas específicas voltadas a reconhecer as particularidades dos bioinsumos, sobretudo por sua estreita relação com práticas de agricultura orgânica e sistemas agroecológicos (Policarpo *et al.*, 2023). A trajetória regulatória dos bioinsumos, nesse sentido, desenvolveu-se paralelamente à regulamentação da produção orgânica no país.

**Figura 1 - As principais visões da bioeconomia**



Fonte: CPI/PUC-Rio (2022)

A normatização da agricultura orgânica no Brasil teve início nos anos 1990, impulsionada por exigências dos mercados internacionais, especialmente após o Regulamento do Conselho da Comunidade Econômica Europeia-CEE (EU/CEE, 1991). Em resposta, o governo brasileiro estabeleceu a Instrução Normativa, que regulava aspectos da produção e comercialização de produtos orgânicos (IBAMA, 1999). A partir de 2002 passou-se a priorizar registros de agrotóxicos de baixa toxicidade (Brasil, 2002). O marco mais relevante ocorreu a partir de 2003, que instituiu o marco legal da produção orgânica e reconheceu práticas como agroecologia e permacultura (Brasil, 2003). Em 2004, o Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA) lançou o Pró-Orgânico para apoiar o setor, promovendo capacitação, aprimoramento normativo e acesso a insumos. A regulamentação visava garantir qualidade, estimular a produção sustentável e ampliar o acesso a mercados.

Entre os anos de 2005 e 2006, o país avançou na regulamentação específica de bioinsumos com a publicação de quatro Instruções Normativas Conjuntas (INCs), que estabeleceram diferentes categorias para os produtos biológicos, como evidenciado no Quadro 3: bioquímicos, semioquímicos, agentes biológicos de controle e agentes microbiológicos de controle. Essas classificações foram essenciais para a consolidação de um marco regulatório mais apropriado às particularidades dos bioinsumos.

Em 2009 ocorreu um avanço no marco regulatório, que passou a diferenciar de forma explícita os produtos fitossanitários de origem biológica daqueles de origem química (Brasil, 2009). Com isso, foi incluído o conceito de “produto fitossanitário com uso aprovado para a agricultura orgânica”, acompanhado de diretrizes específicas para o processo de registro desses insumos. Uma das principais inovações introduzidas por esse decreto foi a criação do mecanismo denominado “especificações de referência”. Esse dispositivo possibilita que o registro de bioinsumos voltados à agricultura orgânica seja baseado em estudos e dados técnicos previamente realizados por instituições públicas ou privadas de ensino, pesquisa ou extensão, desde que sob coordenação do MAPA. Essa mudança reduziu consideravelmente os custos para produtores interessados em registrar tais produtos, ao dispensá-los da realização de testes individuais. Além disso, o decreto estabeleceu parâmetros técnicos que os produtos devem atender, por meio das especificações de referência, consideradas como requisitos mínimos obrigatórios para que o registro seja concedido.

Em 2021, foram promovidas mudanças relevantes na regulamentação dos agrotóxicos no Brasil, com a simplificação dos procedimentos de pesquisa e registro, bem como o estabelecimento de prazos para a análise e avaliação dos produtos pelos órgãos competentes

(Brasil, 2021). No entanto, a flexibilização das exigências, incluindo o registro de princípios ativos independentemente da toxicidade e a autorização de registros provisórios, gerou críticas quanto aos riscos à saúde pública e ao meio ambiente. A priorização da eficiência agrônômica em detrimento da avaliação de impactos sanitários e ambientais levou à rejeição do decreto por entidades nacionais e internacionais, como o Instituto Nacional de Câncer (INCA), órgãos da ONU e representantes do Sistema de Justiça.

**Quadro 3 - Registro de produtos de origem biológica e instruções normativas relacionadas**

| INC            | Tipo de produto                                                | Descrição                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|----------------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| INC nº 32/2005 | Bioquímicos                                                    | Substâncias químicas, de ocorrência natural ou idênticas a ela, cujo mecanismo de ação não seja tóxico. Esses produtos podem ser sintetizados e, pela sua definição, devem tratar-se de uma substância única isolada de alguma matriz natural.                                          |
| INC nº 1/2006  | Semioquímicos                                                  | Norma aplicada à categoria de produtos à base de substâncias químicas que exercem na natureza um papel de comunicação entre os seres vivos, sejam eles pertencentes à mesma espécie ou a espécies diferentes.                                                                           |
| INC nº 2/2006  | Agentes biológicos de controle                                 | Os chamados macrorganismos, como insetos, ácaros, nematoides e todo tipo de seres que desempenham papel de parasita, predador ou competidor em relação à espécie que se pretende controlar.                                                                                             |
| INC nº 3/2006  | Agentes microbiológicos de controle                            | Microrganismos vivos de ocorrência natural, bem como aqueles resultantes de técnicas que impliquem na introdução natural de material hereditário, excetuando-se os organismos cujo material genético (ADN/ARN) tenha sido modificado por qualquer técnica de engenharia genética (OGM). |
| INC nº 3/2014  | Alterações referentes às INCs de bioquímicos e microbiológicos | Altera o Anexo IV da INC nº 32/2005, referente aos estudos exigidos para a avaliação toxicológica e ecotoxicológica de produtos bioquímicos na fase I.                                                                                                                                  |

Fonte: MAPA, ANVISA e IBAMA, 2005, 2006a, 2006b, 2006c, 2014.

Finalmente, já em 2024, instituiu-se o marco legal para bioinsumos no Brasil, abrangendo toda a cadeia, desde produção, registro, uso, transporte, rotulagem, pesquisa e inspeção até incentivos fiscais e criação da Taxa de Registro de Estabelecimento e Produto da

Defesa Agropecuária (TREPDA) para custear a fiscalização (Brasil, 2024). Entre as principais conquistas da nova lei está o reconhecimento das especificidades dos bioinsumos, desvinculando-os da mesma regulamentação aplicada aos agrotóxicos convencionais. A legislação abrange diversos tipos de bioinsumos, como bioestimuladores, semioquímicos, bioquímicos, fitoquímicos, metabólitos, macromoléculas orgânicas e agentes biológicos de controle, considerando seu uso em diferentes sistemas produtivos. Um ponto importante é a isenção de registro para produtos fitossanitários aprovados para agricultura orgânica, quando produzidos para uso exclusivo na própria propriedade, seja ela orgânica ou convencional.

Assim, o conjunto das normas vigentes constitui um marco fundamental para o fortalecimento e expansão da cadeia produtiva de bioinsumos no Brasil. Normas mais claras, adaptadas e acessíveis contribuem para garantir a segurança e a eficácia dos produtos, além de favorecer um ambiente propício à inovação. A simplificação e padronização dos processos de registro tornam a aprovação de bioinsumos mais rápida e econômica, ampliando a oferta e a diversidade de produtos biológicos disponíveis ao mercado agrícola. Com a entrada em vigor da nova legislação, espera-se que o setor ganhe uma base jurídica sólida para avançar rumo à competitividade, descentralização produtiva e democratização do acesso a esses insumos em todo o território nacional.

Apesar dos avanços regulatórios e institucionais que estabeleceram o marco legal dos bioinsumos no Brasil (Brasil, 2024), ainda persistem importantes desafios à competitividade desses insumos em relação aos produtos químicos convencionais, como fertilizantes sintéticos e agrotóxicos. O mercado brasileiro de insumos agrícolas permanece fortemente dependente de importações, especialmente no segmento de fertilizantes. Entre janeiro e novembro de 2025, o país importou 41,73 milhões de toneladas desse insumo, evidenciando uma cadeia de suprimentos altamente exposta às oscilações internacionais de preços e de oferta (Conab, 2025).

Essa dependência externa representa não apenas um risco à segurança produtiva nacional, mas também compromete a autonomia tecnológica e a sustentabilidade econômica do setor agrícola. Entretanto, mesmo diante desses riscos, a nova legislação, aliada à recente reforma tributária (Brasil, 2025), não assegura tratamento fiscal diferenciado ou mais vantajoso para os bioinsumos em relação aos insumos químicos. Ambos permanecem enquadrados nas mesmas regras tributárias, desconsiderando os benefícios ambientais, sociais e econômicos proporcionados pelos bioinsumos. Soma-se a isso o Plano Nacional de Fertilizantes (Brasil, 2022), detalhado mais a adiante nesse capítulo, que mantém incentivos expressivos à continuidade do uso de fertilizantes químicos, reforçando um modelo de produção baseado na

dependência de insumos externos e de alto impacto ambiental, em detrimento de alternativas mais aderentes à agenda sustentável promovidas pela bioeconomia.

### **2.3 Da Revolução Verde à transição para os Bioinsumos**

A chamada “Revolução Verde”, iniciada na década de 1960, marcou um ponto crucial na história da agricultura global, transformando profundamente os métodos tradicionais de cultivo. Este movimento foi impulsionado pela difusão de pacotes tecnológicos tidos como universais, voltados à intensificação da produção e à elevação do potencial produtivo das lavouras. Fundamentado no uso intensivo de fertilizantes sintéticos e agrotóxicos, o modelo promovido visava criar condições ótimas para o crescimento vegetal em larga escala (Barros, 2010; Viera Filho e Fishlow, 2017; Gasques *et al.*, 2022).

Contudo, a partir da década de 1980, os efeitos colaterais dessa intensificação começaram a ser amplamente discutidos, especialmente aqueles ligados à degradação ambiental, à contaminação dos recursos naturais e aos impactos sobre a saúde humana (Pinstrup-Andersen e Hazell, 1985; Conway e Barbie, 1988; Pimentel, 1996; Rani *et al.*, 2021; Rad, Ray e Bargui, 2022). Como resposta a esse cenário, surge o paradigma da sustentabilidade agrícola, orientado por princípios de conservação dos recursos naturais, maior eficiência no uso dos insumos e respeito aos limites ecológicos. Essa abordagem passou a representar um novo caminho para a manutenção da produtividade agrícola aliada à segurança alimentar global.

No centro dessa transição encontra-se o debate sobre a efetividade dos insumos aplicados na produção, sobretudo os químicos, e o papel que alternativas sustentáveis podem exercer nesse processo (Headley, 1968; Antle e Pingali, 1995). A busca por garantir que a oferta agrícola cresça acima da demanda não apenas estabiliza os mercados, mas assegura o abastecimento alimentar e reduz pressões inflacionárias (Prasad, 1999; Stewart e Roberts, 2012). Tais argumentos respaldaram, por décadas, o uso amplo de insumos químicos, mas a intensificação de problemas ambientais e sociais trouxe novos elementos ao debate, entre eles, os bioinsumos que representam a nova agenda de insumos agrícolas no mundo (Rocha *et al.*, 2024; Abbud e Cechin, 2026).

No Brasil, a elevada dependência externa de fertilizantes químicos (com cerca de 85% sendo importados, especialmente da Rússia, Canadá e China) torna o país vulnerável a flutuações geopolíticas e mercadológicas (MAPA, 2021; Conab, 2022), como já salientado anteriormente. Frente a esse desafio estrutural, estratégias têm sido debatidas para fortalecer a

produção nacional e reduzir a dependência externa. Entre essas, destaca-se o incentivo à pesquisa e uso de bioinsumos como instrumentos para manejo mais racional do solo, controle de pragas e melhoria da produtividade com menor impacto ambiental (Embrapa, 2022). O uso desses insumos, tradicionalmente associado à agricultura orgânica e agroecológica, vem crescendo também na agricultura convencional, representando uma alternativa ou complemento ao uso de fertilizantes e agrotóxicos (Hungria, Mendes e Mercante, 2013; Vidal e Dias, 2023).

No Brasil, é possível identificar três categorias principais de unidades produtoras de bioinsumos: as industriais ou comerciais, as *startups*, e as unidades que produzem bioinsumos para consumo próprio (*on farm*<sup>2</sup>) (Sambuichi *et al*, 2024). Cada uma dessas categorias apresenta particularidades específicas, que refletem diferentes formas de atuação, estratégias de produção, pesquisa, desenvolvimento e inovação, além de distintas finalidades quanto ao uso dos bioinsumos.

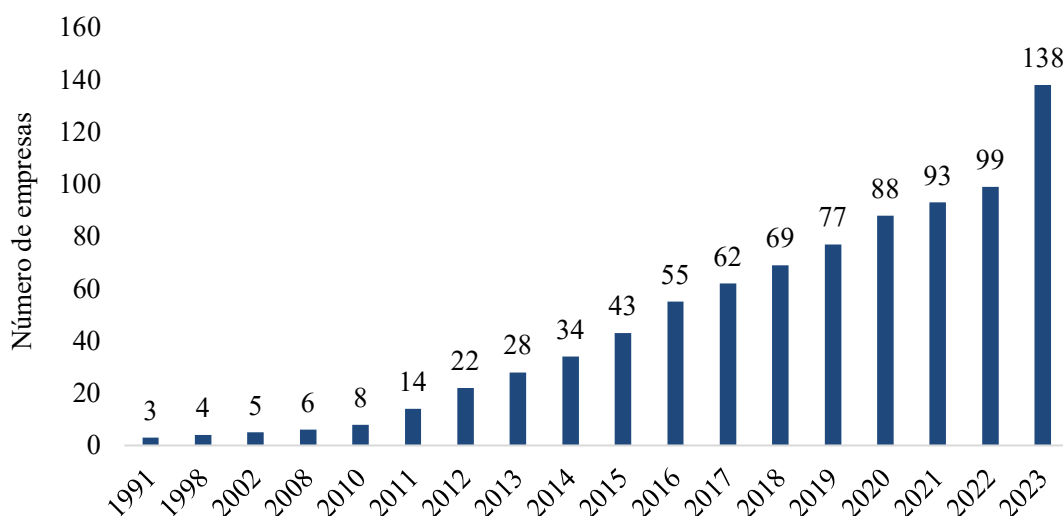
Para fins deste estudo, as características dessas empresas foram organizadas em duas categorias: i) aquelas que detêm registro de produtos biológicos destinados ao controle de pragas e doenças; e ii) aquelas que produzem bioinsumos voltados para a fertilidade do solo e nutrição vegetal, com ênfase em biodefensivos e biofertilizantes. Segundo dados do sistema Agrofit, mantido pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) (Brasil, 2025), foram identificadas 138 empresas distintas com produtos biológicos para controle de pragas e doenças registrados (Figura 2), totalizando 729 produtos registrados, dos quais 332 são fitossanitários com uso aprovado para a agricultura orgânica.

De forma geral, as unidades comerciais ou industriais de produção de bioinsumos consistem em empresas de porte médio a grande que atuam na fabricação em larga escala desses produtos. Essas unidades operam com um modelo de produção intensiva, possuindo alta capacidade produtiva e ampla rede de distribuição. Sua estrutura conta com laboratórios especializados, instalações para fermentação e processos avançados de manufatura. Normalmente, empregam tecnologias modernas nas áreas de biotecnologia e microbiologia para aprimorar e desenvolver seus bioinsumos. Além disso, mantêm elevados padrões de qualidade e segurança, assegurando o registro formal dos produtos para sua comercialização.

---

<sup>2</sup> Refere-se à produção, formulação ou preparo de insumos agrícolas (como biofertilizantes, biodefensivos e compostos orgânicos) realizada no interior da própria unidade produtiva rural, utilizando recursos, resíduos e infraestrutura disponíveis na propriedade.

**Figura 2 - Evolução do número de empresas com registro de produtos para controle de pragas e doenças**



Fonte: Elaborado pela autora com base em Agrofit (2024).

Diferentemente das unidades comerciais ou industriais, a produção *on farm* é realizada diretamente na propriedade rural e voltada ao uso exclusivo do produtor. Esta modalidade, regulamentada pela Lei nº 15.070/2024, é dispensada de registro desde que não envolva comercialização, ainda que deva seguir boas práticas de fabricação e, em determinadas situações, contar com assistência técnica (Cruz, 2025). Tendo em vista o promissor mercado interno e a vasta biodiversidade nacional como fonte de matéria-prima, o Brasil dispõe de considerável potencial para o avanço desta tecnologia, podendo a produção própria reduzir custos para o produtor por dispensar parte da intermediação industrial. No que tange especificamente à dimensão dessa modalidade, estimativas indicam que aproximadamente 46% da área potencial tratada na safra 2024/2025 recebeu aplicação de biológicos produzidos dentro das propriedades rurais, proporção que tende a alcançar 50% até a safra 2029/2030 (Blink Inteligência de Mercado, 2026). Ainda assim, cabe reconhecer uma limitação relevante: dado que a modalidade *on farm* é dispensada de registro e não envolve comercialização, sua mensuração precisa é desafiadora, de modo que tais números devem ser interpretados como aproximações, e não como cifras consolidadas.

## 2.4 Programa Nacional de Bioinsumos

A emergência de modelos produtivos agrícolas mais conscientes tem se tornado imperativo diante dos múltiplos desafios ambientais, sociais e econômicos que atravessam o

setor. Nesse contexto, o Programa Nacional de Bioinsumos (PNB) foi instituído como resposta estratégica à necessidade de fomentar alternativas tecnológicas baseadas na biodiversidade nacional, buscando reduzir a dependência de insumos químicos e ampliar práticas agrícolas de menor impacto ambiental e sanitário (Brasil, 2020a; Sambuichi *et al.*, 2024; Vidal; Dias, 2023).

O PNB foi formalizado por meio do Decreto nº 10.375/2020, complementado pelas Portarias nº 102 e 103, com o objetivo de estruturar um novo paradigma de insumos para a agropecuária, com base em recursos de origem biológica (vegetal, microbiana ou animal). Essa concepção normativa resultou de um processo de construção interinstitucional, precedido por iniciativas no âmbito da Política Nacional de Agroecologia e Produção Orgânica (Planapo). A partir desses esforços, consolidou-se uma concepção ampliada do termo "bioinsumos", que passou a englobar não apenas produtos utilizados na agricultura orgânica, mas também processos e tecnologias aplicáveis a toda a agropecuária nacional, independentemente do modelo produtivo (Vidal *et al.*, 2021; Brasil, 2020a; Brasil, 2020b). O Quadro 4 apresenta a base conceitual detalhada pelo PNB, no que tange produção vegetal e pós-colheita e processamento.

**Quadro 4 - Programa Nacional de Bioinsumos e sua base conceitual**

| Conceito                     | Definição                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Agente biológico de controle | Organismo, assim considerado microrganismo e inimigo natural, de ocorrência natural, introduzido no ambiente para o controle de uma população ou de atividade biológica de outro organismo vivo considerado nocivo                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Ativo biológico              | Microrganismo, planta, invertebrado, substância bioativa, feromônio, entre outros                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Bioestimulante               | Produto que contém substância natural com diferentes composições, concentrações e proporções, que pode ser aplicado diretamente nas plantas, nas sementes e no solo, com a finalidade de incrementar a produção, melhorar a qualidade de sementes, estimular o desenvolvimento radicular, favorecer o equilíbrio hormonal da planta e a germinação mais rápida e uniforme, interferir no desenvolvimento vegetal, estimular a divisão, a diferenciação e o alongamento celular, incluídos os processos e as tecnologias derivados do bioestimulante |
| Biofertilizante              | Produto que contém componentes ativos ou substâncias orgânicas, obtido de microrganismos ou a partir da atividade destes, bem como seus derivados de origem vegetal e animal, capaz de atuar direta ou indiretamente sobre o todo ou parte das plantas cultivadas, no aumento de sua produtividade ou na melhoria de sua qualidade, incluídos os processos e tecnologias derivados desta definição.                                                                                                                                                 |

| <b>Conceito</b>                      | <b>Definição</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|--------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Comunidade de microrganismos         | Conjunto de células microbianas com características multifuncionais, preparado por isolamento local podendo atuar como agente biológico de controle, bioestimulante e biofertilizante.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Condicionador biológico de ambientes | Substância simples ou composta, normalmente originada de processos fermentativos, que melhoram a diversidade e consequentemente a atividade microbiológica dos ambientes de produção, contribuindo para a melhoria da sanidade, redução da emissão de gases amoniacais e promovendo a exclusão competitiva de microrganismos prejudiciais em sistemas produtivos animais e vegetais.                                                                                                                                                                                                                       |
| Condicionador de solo                | Produto, processo ou tecnologia que promove a melhoria das propriedades físicas, físico-químicas ou da atividade biológica do solo.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Estresse abiótico                    | Impacto negativo de fatores não vivos, físicos, químicos ou ambos, sobre os organismos em um ambiente específico, considerada a temperatura, o estresse hídrico e a salinidade, entre outros.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Inoculante                           | Produto, processo ou tecnologia que contém microrganismos com atuação favorável ao desenvolvimento de plantas.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Manejo de animais                    | Manejo de espécies ou raças que apresentem equilíbrio entre produtividade e rusticidade, entendida como a base genética dos sistemas de base agroecológica e orgânica, que permita a manutenção da saúde, resposta economicamente viável e produtos e subprodutos compatíveis com as expectativas de mercado.                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Manejo de espécies vegetais          | Manejo de espécies e variedades de origem vegetal, entendida como a base genética dos sistemas de base agroecológica e orgânico, na qual se refere a diversidade entre e dentro de espécies, interagindo com a diversidade de uso e cultivos, sempre de forma sistêmica e multidiversa.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Produção para uso próprio            | Produção de condicionadores de solo, inoculantes, produtos fitossanitários, de comunidade de microrganismos com uso aprovado para a agricultura orgânica ou de agente biológico de controle, regulamentado em norma específica pelo MAPA, a ser utilizada exclusivamente em área de produção agrícola pertencente a mesma pessoa física ou jurídica ou em áreas de produtores rurais em regime de associação constituída para esta finalidade.                                                                                                                                                             |
| Produto fitossanitário               | Feromônio, aleloquímico e produto formulado à base de cobre, de boro, de enxofre, de óleo mineral e de compostos e derivados de origem vegetal, animal e mineral, incluídos os agentes biológicos de controle, que atendam à legislação de produção orgânica, destinados ao uso na produção, no armazenamento e no beneficiamento de produtos agrícolas, nas pastagens ou nas florestas plantadas, cuja finalidade seja alterar a composição da flora ou da fauna, a fim de preservá-las da ação danosa de seres vivos considerados nocivos, incluídos os processos e tecnologias derivados desse produto. |

| Conceito                                               | Definição                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Produto para fertilidade de solo e nutrição de plantas | Produto recomendado para manutenção ou incremento da capacidade do solo em sustentar o crescimento e a produtividade das plantas, considerados os remineralizadores de solo, os calcários e fosfatos naturais, os bioestimulantes, inoculantes e os biofertilizantes, incluídos os processos e tecnologias derivados desse produto |
| Produto para processamento de origem animal e vegetal  | Produto, processo ou tecnologia de transformação de matéria-prima de origem animal ou vegetal, isenta de substâncias tóxicas, para aumentar sua vida útil, manter sua qualidade e garantir a segurança e as expectativas do consumidor                                                                                             |
| Produto pós-colheita de origem animal e vegetal        | Produto, processo ou tecnologia de conservação e embalagem, incluídos os revestimentos comestíveis para alimentos de origem animal e vegetal, in natura e minimamente processados, que visem a redução de perdas pós-colheita, a qualidade e a segurança alimentar                                                                 |
| Unidade própria de produção                            | Local onde ocorre a produção para uso próprio                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Fonte: Brasil, 2022                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |

Do ponto de vista institucional, o programa é estruturado em torno de eixos temáticos (Figura 3) que articulam ações de pesquisa, desenvolvimento, inovação, regulação e fomento à produção e ao uso de bioinsumos. Esses eixos, de forma mais específica para o eixo de produção vegetal, abrangem áreas como controle de pragas, nutrição vegetal, fertilidade do solo e manejo de espécies vegetais, cada um com linhas de ação específicas que incluem gestão da informação, desenvolvimento normativo, crédito e financiamento, além de estratégias de capacitação e difusão tecnológica (Sambuichi *et al.*, 2024; Vidal *et al.*, 2021).

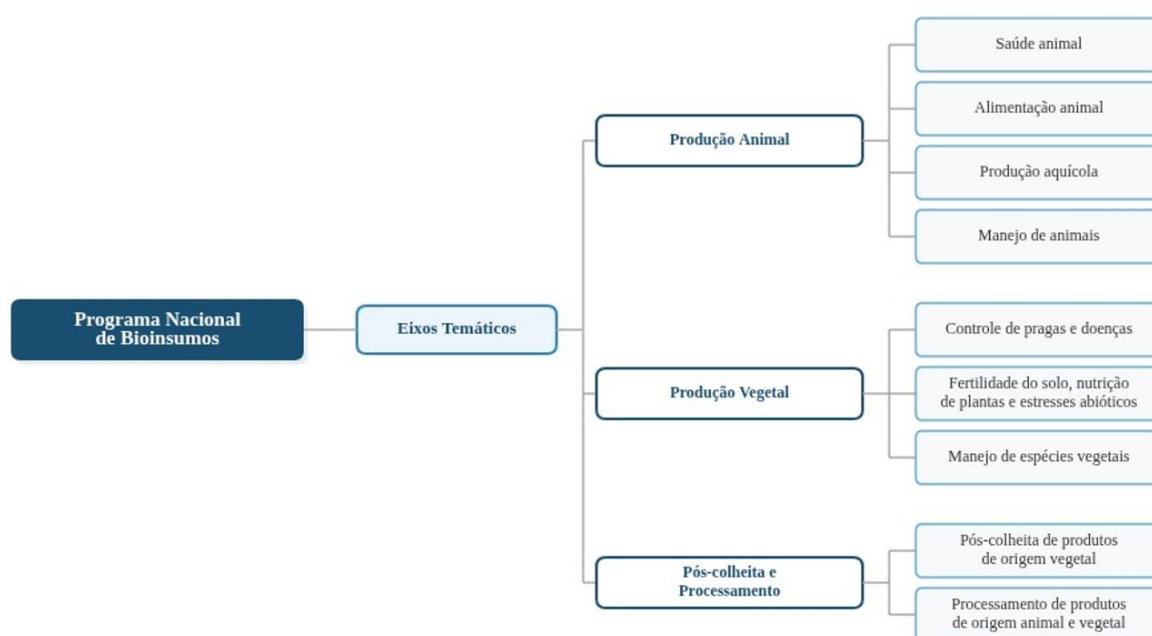
O programa é gerido pelo MAPA e conta com o apoio de um Conselho Estratégico que inclui instituições federais como a Embrapa, Anvisa, Ibama, MCTI e representantes da sociedade civil, conforme estabelecido pela Portaria nº 276/2022. Essa governança busca assegurar uma gestão participativa e transversal, envolvendo setores estratégicos para a consolidação de políticas públicas de inovação tecnológica e sustentabilidade na produção agropecuária (Brasil, 2020b; Vidal; Dias, 2023).

A atuação da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) é fundamental para sustentar o avanço técnico-científico do programa. Com mais de 70 projetos em andamento e cerca de 600 pesquisadores envolvidos, a instituição mantém bancos de germoplasma com milhares de linhagens de micro-organismos utilizados em controle biológico e promoção do

crescimento vegetal, consolidando uma base sólida de inovação endógena e soberania tecnológica (MAPA, 2020; Embrapa, 2021).

O arcabouço do programa ainda prevê a elaboração de um catálogo nacional de bioinsumos, a criação de um ambiente regulatório favorável à inovação e o incentivo à geração de normas técnicas, protocolos de produção e estratégias de vigilância e rastreabilidade. Com isso, o PNB busca não apenas substituir os insumos químicos, mas transformar práticas produtivas, induzindo uma mudança estrutural no modelo agropecuário vigente (Brasil, 2020b; IPEA, 2020).

**Figura 3 - Representação esquemática dos eixos temáticos do PNB**



Fonte: Vidal *et al* (2021)

A consolidação do PNB reforça o papel do Brasil como protagonista global da bioeconomia, ao integrar biodiversidade, ciência, inovação e políticas públicas para a sustentabilidade. A amplitude do programa permite alcançar desde sistemas convencionais até práticas agroecológicas, promovendo a convergência de interesses entre diferentes segmentos do setor produtivo, da sociedade e do Estado. A institucionalização dos bioinsumos como política pública representa, portanto, uma oportunidade singular para avançar na construção de um novo paradigma tecnológico para o campo brasileiro, alicerçado na valorização dos recursos

naturais, na autonomia tecnológica e na resiliência produtiva frente às crises ambientais e de mercado.

Por fim, vale salientar que embora o PNB represente um marco institucional relevante ao reconhecer e estruturar o uso desses insumos na agricultura brasileira, observa-se a ausência de metas numéricas explícitas e de métricas de longo prazo associadas ao seu monitoramento e avaliação. Essa característica limita a utilização direta do programa como base quantitativa para simulações econômicas prospectivas apresentadas nos Capítulo 5. Diante disso, a avaliação de política realizada nesta tese, por meio de um modelo de equilíbrio geral computável (EGC), não se apoia na mensuração direta dos resultados do programa, mas sim da análise dos efeitos de políticas de subsídios aos bioinsumos sob cenários fiscais específicos, mais bem argumentados no decorrer do trabalho.

#### 2.4.1 Mecanismos de transmissão do Programa e Teoria da Mudança

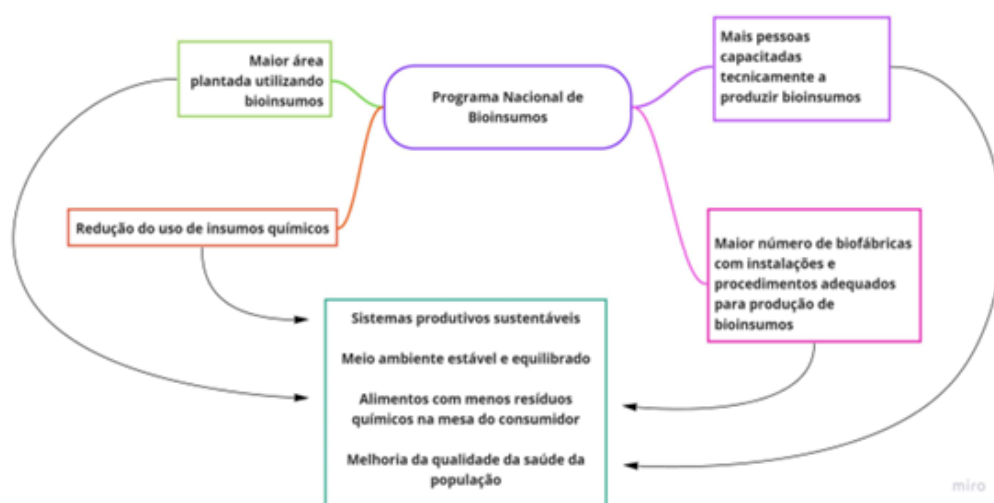
De acordo com a Teoria da Mudança (Weiss, 1997), desenvolvida no campo da avaliação de políticas públicas, parte-se da compreensão de que os objetivos finais de uma intervenção são alcançados por meio de uma cadeia lógica que articula insumos, atividades, produtos, resultados e impactos esperados para a sociedade. Nesse sentido, programas públicos devem ser entendidos como empreendimentos de elevada complexidade, formulados à luz de valores públicos, princípios constitucionais e pressupostos normativos, como destaca Januzzi (2021), ao associar o desenho programático a direitos sociais fundamentais e ao direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, previstos na Constituição Federal de 1988.

A explicitação dessa lógica contribui para tornar mais claros os fundamentos e significados do Programa Nacional de Bioinsumos (PNB), bem como para identificar fatores que favorecem ou limitam seu desempenho. Contudo, conforme argumenta Weiss (1997), não basta descrever a teoria do programa, é necessário compreender como e por quais mecanismos as ações produzem mudanças na realidade, sendo a teoria da mudança justamente o esforço analítico de explicitar esses mecanismos causais que conectam a intervenção aos efeitos esperados. Na Figura 4 é apresentada a teoria da mudança proposta para o PNB.

De acordo com a Teoria da Mudança, o contexto no qual o programa se insere constitui um pressuposto central para a compreensão dos processos e resultados esperados. O agronegócio brasileiro opera em um ambiente internacional marcado por elevada instabilidade geopolítica, com conflitos armados, tensões comerciais e políticas protecionistas que afetam

diretamente a segurança do abastecimento de fertilizantes, insumo estratégico cuja produção global é altamente concentrada em poucos países exportadores (Cardoso *et al*, 2025). Essa configuração torna o Brasil, como grande importador líquido (ANDA, 2024), particularmente vulnerável, expondo o setor agrícola a riscos de descontinuidade no suprimento, volatilidade de preços e aumento dos custos de produção (Conab, 2025).

**Figura 4 - Teoria da Mudança proposta para o PNB**



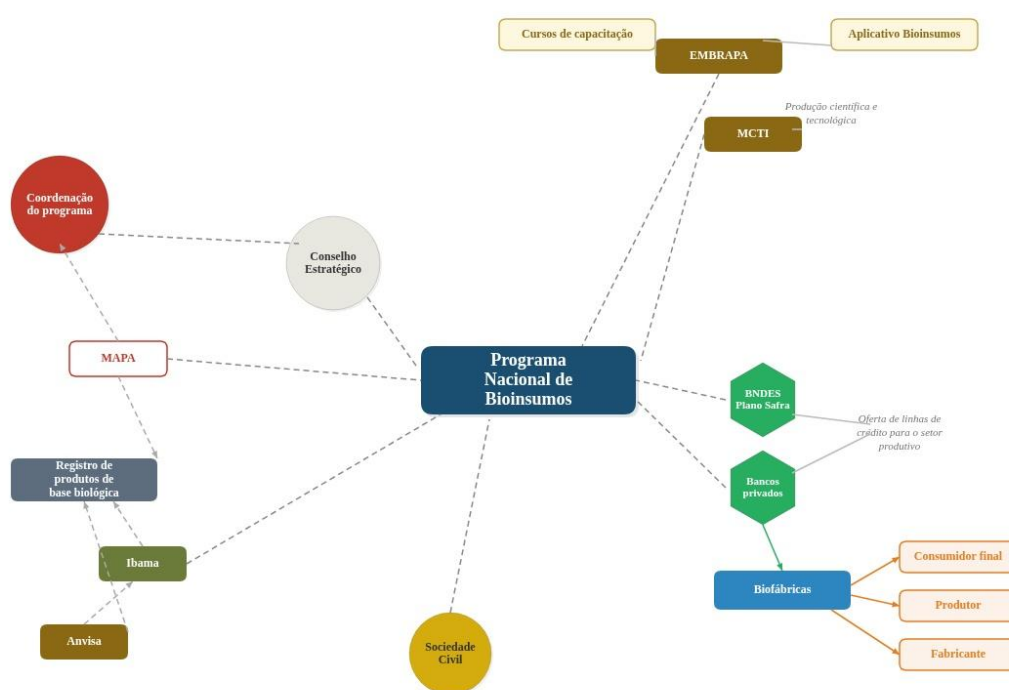
Fonte: Xavier, 2022

Esse cenário externo se combina a condicionantes estruturais internos, como a forte dependência de fertilizantes minerais em função das características de solo e clima predominantes no país, especialmente nos solos ácidos do Cerrado, bem como a limitações logísticas nacionais. A elevada dependência de importações, aliada a gargalos em portos, rotas e infraestrutura de escoamento, reforça a fragilidade do sistema produtivo frente a choques energéticos e logísticos (Pera e Caixeta Filho, 2024; Cardoso *et al*, 2025). Nesse contexto, a promoção dos biofertilizantes (incluindo a produção *on farm* e o fortalecimento de biofábricas) emerge como resposta estratégica para ampliar a resiliência produtiva, reduzir custos e mitigar riscos sistêmicos. Assim, o contexto descrito fundamenta a lógica causal do programa, na qual recursos institucionais, técnicos e financeiros, articulados com atores-chave como a Embrapa e empresas do setor, criam as condições necessárias para que as atividades previstas gerem produtos, resultados e impactos alinhados à sustentabilidade produtiva, ambiental e social.

Desse modo, com base na Teoria da Mudança, a implementação do programa tal como concebido, parte da articulação entre insumos, atividades e produtos para gerar resultados

intermediários e, posteriormente, impactos no mundo real. No nível dos resultados, espera-se a ampliação da área cultivada com uso de bioinsumos, acompanhada da redução progressiva do emprego de insumos químicos, bem como o fortalecimento das capacidades técnicas por meio de ações de capacitação, refletido no aumento do número de profissionais habilitados para atuar na produção desses insumos. Soma-se a isso a expectativa de expansão e estruturação de biofábricas aptas a produzir bioinsumos de forma adequada. Na Figura 5 evidencia-se o desenho e arquitetura do PNB, com os principais atores relacionados ao programa.

**Figura 5 – Desenho e arquitetura do PNB**



Fonte: Xavier (2022)

A análise da arquitetura do PNB evidencia que, embora existam diversos atores articulados em torno da política, com destaque para a Embrapa, empresas privadas, instituições estaduais de pesquisa e órgãos reguladores, ainda não há um elemento de apoio subsidiado consolidado no Brasil capaz de sustentar a transição produtiva no horizonte de longo prazo. Essa lacuna institucional é justamente o ponto em que o modelo BIO-BR se mostra particularmente relevante. Ao incorporar à análise atores e instrumentos com vinculação direta

à política, como o governo enquanto agente fiscal, os mecanismos de tributação e o subsídio com orçamento livre, o modelo permite simular como diferentes desenhos de financiamento e arranjos institucionais condicionam a magnitude e a distribuição dos efeitos esperados, detalhados no Capítulo 5 de resultados dessa Tese.

## **2.5 Plano Nacional de Fertilizantes**

Tendo em vista o quadro de dependência externa descrito anteriormente, cabe examinar de que maneira o Estado brasileiro tem respondido a essa vulnerabilidade no plano das políticas públicas. A resposta institucional mais abrangente formulada nos últimos anos é o Plano Nacional de Fertilizantes (PNF), cuja origem remonta ao Decreto nº 10.605, de 22 de janeiro de 2021, que instituiu o Grupo de Trabalho Interministerial encarregado de sua elaboração, com a finalidade declarada de fortalecer políticas de incremento da competitividade da produção e da distribuição de fertilizantes no país de forma sustentável (Brasil, 2022).

No que tange ao diagnóstico que fundamenta o plano, três elementos merecem destaque. Primeiramente, o Brasil responde por cerca de 8% do consumo global de fertilizantes, ocupando a quarta posição mundial, atrás apenas de China, Índia e Estados Unidos (Brasil, 2022). Trata-se de uma posição que se manteve ao longo do período recente e que, se levarmos em conta o volume absoluto, tende a se ampliar, uma vez que as entregas ao mercado interno alcançaram 49,11 milhões de toneladas em 2025, o maior patamar da série histórica e crescimento de 7,7% em relação a 2024 (Anda, 2026).

Em segundo lugar, a demanda é fortemente concentrada, uma vez que soja, milho e cana-de-açúcar respondem por mais de 73% do consumo nacional (Brasil, 2022), ao passo que culturas historicamente associadas ao abastecimento interno, como feijão e arroz, ainda apresentam margem relevante para ganhos de produtividade e são mais suscetíveis à volatilidade dos preços internacionais de insumos. Tal concentração não se alterou de maneira expressiva desde a formulação do plano, na medida em que a expansão recente das entregas tem sido puxada justamente pela ampliação da área plantada de soja e de milho (Anda, 2026), o que sugere que a estrutura da demanda por nutrientes permanece atrelada às culturas voltadas à exportação.

Quanto ao terceiro elemento de destaque, tem-se que mais de 80% dos fertilizantes utilizados no país são importados, em um mercado dominado por poucos fornecedores (Brasil, 2022), o que expõe a economia brasileira, fortemente apoiada no agronegócio, às oscilações do

mercado internacional. Em relação a esse ponto, cabe ressaltar que os dados mais recentes apontam para um quadro de dependência ainda mais acentuado do que o registrado no diagnóstico original. As importações de fertilizantes intermediários somaram 43,32 milhões de toneladas em 2025, ante uma produção nacional de 7,22 milhões de toneladas, o que corresponde a algo próximo de 88% do volume entregue ao mercado interno (Anda, 2026). Quando a mensuração é feita em termos de nutrientes, e não de produto, a razão entre importação e consumo do complexo NPK (Nitrogênio, Fósforo e Potássio) supera 90%, com desempenho particularmente frágil nos casos do nitrogênio e do potássio (Insper, 2025).

Dessa maneira, verifica-se que o coeficiente de dependência externa não apresentou redução no período posterior ao lançamento do plano, tendo permanecido estável ou mesmo se elevando. Tal constatação, entretanto, deve ser interpretada com cautela, em virtude de dois aspectos. Primeiramente, o horizonte de maturação das metas de capacidade instalada é de médio e longo prazo, de modo que não seria razoável esperar inflexão da série em prazo tão curto. Em segundo lugar, a expansão acelerada da demanda, associada ao crescimento da área plantada, opera no sentido de elevar o denominador da razão, ainda que a produção doméstica cresça em termos absolutos. Ainda assim, tendo em vista que o próprio plano estabelece como referência a redução da dependência para algo entre 45% e 50% até 2050 (Brasil, 2022), a trajetória observada até aqui aponta para evidências de que o esforço requerido é consideravelmente superior ao ritmo corrente de expansão da oferta interna.

Acerca da articulação desses três elementos, entende-se que o diagnóstico do PNF combina vulnerabilidade externa, concentração da demanda e segurança alimentar, e não apenas uma preocupação com custos de produção. Trata-se de uma distinção relevante para os fins desta Tese, no sentido de que ela desloca o problema dos fertilizantes do terreno estrito da competitividade agrícola para o terreno da política de abastecimento e, como veremos, também para o da transição tecnológica. Tal deslocamento é reforçado pela composição geográfica das importações, dado que parcela expressiva do nitrogênio consumido no país provém de regiões sujeitas a instabilidade geopolítica recorrente, o que adiciona ao problema uma dimensão de risco de suprimento que não se reduz a preço (Anda, 2024).

Em relação à arquitetura do plano, o PNF organiza-se em torno de seis linhas de ação, quais sejam, nitrogênio, fósforo, potássio, cadeias emergentes, ciência, tecnologia e inovação, e sustentabilidade ambiental. Tais linhas desdobram-se em cinco objetivos estratégicos, aos quais estão associadas metas quantificadas e ações. O primeiro objetivo trata da modernização, reativação e ampliação das plantas e projetos existentes, com metas de capacidade instalada

para 2025, 2030, 2040 e 2050. O segundo volta-se à melhoria do ambiente de negócios, contemplando política tributária, desburocratização, regime especial de incentivo à infraestrutura da indústria de fertilizantes e leilões de áreas minerárias. O terceiro busca promover vantagens competitivas na cadeia nacional, com ênfase em conhecimento geológico, gás natural e hidrogênio. O quarto trata da ampliação dos investimentos em pesquisa, desenvolvimento e inovação. O quinto, por sua vez, aborda a adequação da infraestrutura logística, com metas de redução de custos de transporte e portuários. Note-se que a estrutura combina instrumentos de natureza distinta, no sentido de que metas de capacidade produtiva convivem com metas regulatórias, tributárias, tecnológicas e de formação de recursos humanos. (Brasil, 2022)

Acerca da interseção entre o PNF e a agenda de sustentabilidade, a leitura se sustenta em pelo menos quatro eixos de metas. O primeiro diz respeito à substituição parcial de fontes minerais por fontes orgânicas e organominerais. O plano estabelece o aumento da produção e da oferta de fertilizantes orgânicos e organominerais em pelo menos 25% até 2025, 50% até 2030, 200% até 2040 e 500% até 2050, além da ampliação do número de fábricas de fertilizantes organominerais no Centro-Oeste e Centro-Norte em 25% até 2030, 50% até 2040 e 100% até 2050. O segundo eixo refere-se à economia circular, na medida em que se prevê o reaproveitamento de resíduos sólidos e subprodutos com potencial de uso agrícola em pelo menos 10% da produção até 2030, 30% até 2040 e 70% até 2050, bem como a implantação de mil plantas de beneficiamento de remineralizadores até 2050, capazes de produzir 18 milhões de toneladas anuais a partir de produtos e coprodutos.

O terceiro eixo, possivelmente o mais relevante para a discussão sobre bioinsumos, envolve a fixação biológica de nitrogênio (FBN) e os insumos de base biológica. Em relação a esse ponto, o plano estabelece o aumento de pelo menos 50% da oferta de nitrogênio proveniente da FBN e de fontes orgânicas até 2040, bem como a ampliação da contribuição da fixação biológica em pelo menos 35% até 2030, 50% até 2040 e 100% até 2050 sobre a demanda nacional de nitrogênio. Adicionalmente, prevê-se a redução de pelo menos 90% no uso de nitrogênio em fertilizantes destinados à cultura da soja até 2030, a ampliação em 100% da área de adoção de inoculantes na cultura do feijão até 2030 e o incremento da adoção de bioinsumos para nutrição de plantas em pelo menos 25% até 2030, 50% até 2040 e 75% até 2050 da área plantada de culturas altamente dependentes de NPK, como milho, café e cana-de-açúcar. Do lado da oferta tecnológica, o plano contempla a bioprospecção de pelo menos cem novos bioinsumos até 2030, com base em sequenciamento de nova geração e bioinformática,

além de linhas de fomento à pesquisa da ordem de R\$ 20 milhões anuais voltadas ao desenvolvimento de bioinsumos associados à adaptação das culturas às mudanças climáticas. Tais metas são acompanhadas de ações de articulação entre instituições científicas e setor privado voltadas explicitamente à redução da dependência de fertilizantes nitrogenados, e de editais destinados a formulações de inoculantes multifuncionais e a comunidades microbianas com diferentes mecanismos de ação.

O quarto eixo, por fim, contempla a descarbonização e a eficiência no uso de nutrientes. Neste sentido, o plano prevê a redução de 15% nas emissões de gases de efeito estufa no processo industrial, a difusão de boas práticas que minimizem tais emissões em 10% até 2030, 20% até 2040 e 30% até 2050, a redução do consumo de água e energia em proporções equivalentes, e a diminuição das perdas gasosas de nitrogênio em pelo menos 50% até 2025, 70% até 2040 e 90% até 2050. Cabe ressaltar ainda a aposta em rotas de menor intensidade de carbono para os nitrogenados, no sentido da atração de investimentos para pelo menos três unidades baseadas em amônia verde ou azul até 2050 e do fomento à implantação de uma planta baseada em hidrogênio verde ou azul a cada dez anos, o que conecta o plano às políticas nacionais de gás natural e de hidrogênio. Soma-se a isso a incorporação explícita de parâmetros ESG, com meta de 100% de adequação das empresas que operam empreendimentos de fertilizantes no Brasil até 2030 e de integração da cadeia ao mercado de carbono.

Em linhas gerais, pode-se interpretar o PNF como um instrumento de dupla natureza, no sentido de que busca, simultaneamente, reduzir a exposição do produtor rural a choques externos por meio da expansão da produção mineral doméstica e reduzir a intensidade material e energética da nutrição de plantas por meio de bioinsumos, organominerais, remineralizadores e reaproveitamento de resíduos. Essa dupla natureza, entretanto, comporta tensões que merecem ser levadas em conta. Primeiramente, a expansão da exploração de rocha fosfática e de potássio, prevista em metas de capacidade instalada até 2050, convive com ações de ajuste da regulação ambiental que estabelecem prazos de análise de até 120 dias para a pesquisa e exploração mineral, o que suscita a discussão sobre os custos ambientais associados ao próprio objetivo de autonomia produtiva. Em segundo lugar, as metas relativas a bioinsumos e à FBN, ainda que expressivas em magnitude, são majoritariamente metas de adoção e de oferta, e não de resultado agrônomo verificado em campo, de modo que sua efetividade depende de validação tecnológica e de instrumentos de monitoramento que o próprio plano ainda pretendia constituir, a exemplo do Sistema Nacional de Informação sobre Fertilizantes e Nutrição de Plantas. Por fim, trata-se de um plano indicativo, cujo horizonte de 2050 e cujos ciclos de revisão tornam a

avaliação de efetividade um exercício necessariamente parcial neste momento. Ainda assim, no que tange ao escopo desta Tese, o PNF é relevante por explicitar que a redução da dependência externa de fertilizantes vem sendo formulada, na esfera pública, não apenas como um problema de expansão da oferta mineral, mas também como um problema de transição para práticas agrícolas mais limpas.

## **2.6 Perspectivas do mercado de bioinsumos no Brasil e no mundo**

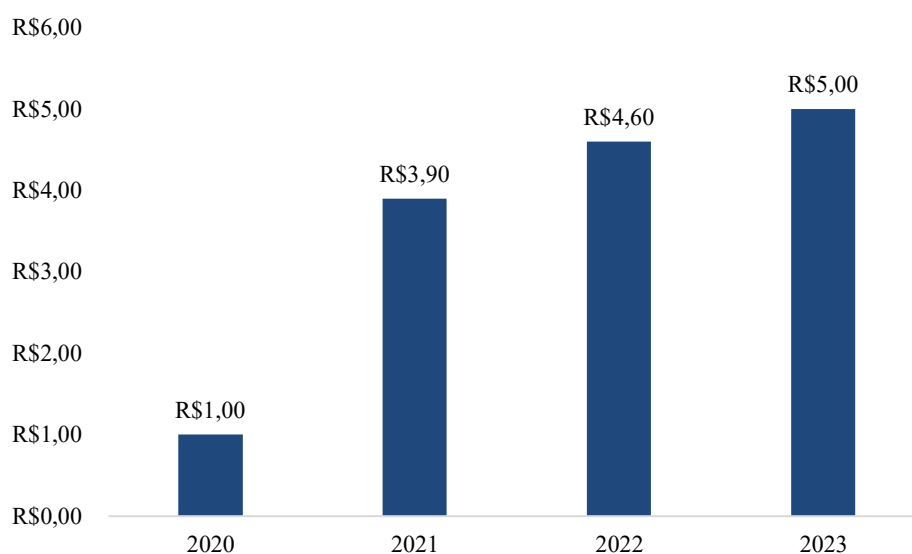
O setor de bioinsumos tem registrado um avanço notável tanto no cenário internacional quanto no Brasil. Segundo levantamento encomendado pela Croplife Brasil à Blink (2024), o mercado mundial de bioinsumos foi estimado, em 2023, entre 13 e 15 bilhões de dólares, incluindo categorias como controle biológico, inoculantes, bioestimulantes e solubilizadores. As estimativas apontam para uma taxa de crescimento anual entre 13% e 14% até 2032, o que pode elevar o valor total do mercado para aproximadamente 45 bilhões de dólares, o triplo do valor atual. Dentre os segmentos, o de controle biológico lidera, representando cerca de 57% do mercado global, e deve manter essa posição dominante nos próximos anos. Esse desempenho está sendo impulsionado por uma expectativa de maior uso desses produtos em culturas de larga escala, especialmente em países como Estados Unidos e membros da União Europeia, que vêm seguindo a tendência já consolidada no Brasil, um dos países com maior índice de adoção desses insumos no mundo (Croplife Brasil, 2024).

O mercado nacional movimentou cerca de R\$ 5 bilhões na safra 2023/2024 (Figura 6), um incremento de 15% em relação ao ciclo anterior. Nos últimos três anos, a taxa média de crescimento anual no país foi de 21%, valor significativamente acima da média mundial. Durante a safra 2022/2023, a área agrícola tratada com bioinsumos aumentou mais de 35%, alcançando 12% da área total cultivada. (Croplife Brasil, 2024).

A proporção de área agrícola tratada com bioinsumos no Brasil apresentou leve elevação, passando de 22% na safra 2022/2023 para 23% na safra 2023/2024. Esse avanço tem sido impulsionado, sobretudo, pela maior utilização de biofungicidas, bioinseticidas e bionematicidas. No que se refere às principais culturas, os bionematicidas têm sido amplamente aplicados em lavouras de algodão e soja; os bioinseticidas em plantações de cana-de-açúcar e milho; os biofungicidas em milho e soja; enquanto hortaliças e frutas (HF) têm adotado tanto bionematicidas quanto biofungicidas (Croplife Brasil, 2024). Uma pesquisa da McKinsey & Company (2022) apontou que os produtores rurais brasileiros estão entre os mais engajados no

uso de bioinsumos, com destaque especial para os biodefensivos. Já os biofertilizantes, classificados no Brasil como inoculantes, são utilizados por cerca de 36% dos agricultores, segundo dados do MAPA/IICA/ABBI (2024, p. 37).

**Figura 6 - Panorama do setor de bioinsumos no Brasil (R\$ bilhões a preços correntes)**



Fonte: Croplife Brasil, 2025

No contexto da produção própria de bioinsumos (conhecida como produção *on farm*) estimativas da consultoria S&P Global (2021) apontam que, em 2020, essa modalidade representou cerca de 22% do valor total movimentado pelo mercado de controle biológico no Brasil, o que equivale a aproximadamente R\$ 308 milhões. Desse montante, cerca de 75% ou algo em torno de R\$ 230 milhões, referem-se a produtos microbiológicos, com destaque para os formulados à base de bactérias. Ainda segundo a mesma fonte, na safra 2019/2020, aproximadamente 3,1 milhões de hectares foram tratados com bioinsumos produzidos diretamente pelos agricultores, o que corresponde a 23% da área total manejada com tecnologias de controle biológico no país, estimada em 13,5 milhões de hectares.

As projeções de crescimento para essa modalidade de produção são igualmente expressivas. A taxa média de expansão anual prevista para o período de 2020 a 2025 é de 47%, enquanto a estimativa acumulada até 2030 é de 26% (S&P Global, 2021), indicando uma tendência consistente de ampliação da prática de produção *on farm* no cenário agrícola nacional.

Esse crescimento está fortemente associado ao ambiente regulatório brasileiro, que tem favorecido o desenvolvimento do setor ao estabelecer diretrizes claras para o registro, a

produção e a comercialização dos bioinsumos. Essa regulamentação tem criado condições mais seguras e estáveis para o investimento, contribuindo para a expansão tanto das unidades comerciais quanto da produção realizada nas próprias propriedades rurais. Com regras bem definidas, aumenta-se a confiança dos produtores e das empresas no mercado, facilitando a adoção de práticas mais sustentáveis e inovadoras.

A relação entre regulação adequada, desenvolvimento da indústria de bioinsumos e ampliação de sua adoção no campo é, portanto, direta. À medida que o marco legal avança, cria-se um cenário mais propício para que novas empresas entrem no setor e para que unidades produtivas já existentes possam expandir sua capacidade de atuação. Esse dinamismo amplia a oferta de soluções biológicas, gerando alternativas mais sustentáveis e eficazes em substituição/complementação aos defensivos químicos convencionais.

#### 2.5.1 Biocompostagem de resíduos sólidos e lodo de esgoto

A gestão de resíduos sólidos urbanos e do lodo gerado nas estações de tratamento de esgoto (ETEs) constitui um desafio, particularmente em países em processo de universalização do saneamento básico. No Brasil, o Novo Marco Legal do Saneamento Básico (Lei nº 14.026/2020) estabeleceu metas para universalizar a coleta e o tratamento de esgotos até 2033, o que implicará na implementação de novas ETEs e na expansão das existentes, com consequente aumento na geração de lodo (Quintana, Carmo e Melo, 2011). Simultaneamente, a produção de resíduos sólidos municipais segue em trajetória ascendente, impulsionada pelo crescimento populacional e pela urbanização (Onicha et al, 2024). Nesse contexto, a biocompostagem que é o processo de decomposição aeróbica controlada que transforma resíduos orgânicos em compostos estáveis e ricos em nutrientes, emerge como uma solução que articula gestão ambiental e produção agrícola sustentável, integrando-se de forma direta aos princípios da economia circular (Sayara *et al.*, 2020; Pajura, 2024).

O mercado global de fertilizantes orgânicos, que engloba compostos derivados de resíduos animais, vegetais e urbanos, foi avaliado entre US\$ 10,6 bilhões e US\$ 14,7 bilhões em 2024, com projeções de crescimento que variam entre US\$ 17,2 bilhões (Grand View Research, 2024) e US\$ 32,6 bilhões (Market Research Future, 2026) até o início da década de 2030. A América do Sul respondeu por aproximadamente US\$ 0,9 bilhão em 2024, com expectativa de atingir US\$ 1,5 bilhão até 2035 (Market Research Future, 2026). O segmento de compostagem, incluindo biocompósitos derivados de lodo de esgoto e fração orgânica de

resíduos sólidos, representa parcela crescente desse mercado, impulsionado pela pressão regulatória sobre o uso de fertilizantes sintéticos e pela busca por práticas alinhadas à economia circular (Sayara *et al.*, 2020; Pajura, 2024). Na União Europeia, a revisão da Diretiva de Nitratos em 2024 reduziu os limites de aplicação de nitrogênio sintético para 170 kg/ha em zonas vulneráveis, acelerando a substituição por compostos orgânicos de liberação lenta (Mordor Intelligence, 2026). Essas tendências regulatórias internacionais são particularmente relevantes para o Brasil, na medida em que mercados importadores crescentemente exigentes podem condicionar o acesso das exportações agrícolas brasileiras à adoção de práticas sustentáveis na cadeia de produção.

O arcabouço regulatório brasileiro tem avançado na direção de viabilizar essa conversão. A Resolução CONAMA nº 498/2020 regulamenta o uso do lodo de esgoto no solo, e a Instrução Normativa SDA nº 61/2020, revisada em 2023, eliminou restrições que impediam o uso de fertilizantes derivados de lodo em hortaliças e plantas ornamentais, ampliando substancialmente o mercado. O Plano Nacional de Fertilizantes (PNF) reconhece explicitamente a busca por fontes sustentáveis e domésticas de nutrientes como diretriz estratégica. Do ponto de vista agrônomo, o lodo é considerado um biofertilizante de elevado potencial, com teores de matéria orgânica entre 60% e 75% em base seca e concentrações significativas de nitrogênio, fósforo e micronutrientes, podendo substituir parcial ou integralmente fertilizantes minerais em diversas culturas, conforme evidenciado por estudos conduzidos em milho, cana-de-açúcar, feijoeiro e gramíneas forrageiras (Coutinho *et al.*, 1997; Dias e Silva, 2016; Gomes, Rigby *et al.*, 2016; Gomes *et al.*, 2025).

A literatura recente tem enfatizado a compostagem como componente central da economia circular aplicada à agricultura. Ao fechar o ciclo de nutrientes, a biocompostagem transforma resíduos que seriam destinados a aterros em insumos produtivos, reduzindo simultaneamente as emissões de metano que resultariam da decomposição anaeróbica em aterros e contribuindo para o sequestro de carbono no solo (Palaniveloo *et al.*, 2020; Przydatek e Wota, 2024). Essas externalidades positivas não capturadas pelo sistema de preços constituem uma justificativa econômica para políticas de incentivo ao setor, na medida em que o benefício social da biocompostagem excede o benefício privado apropriado pelas empresas de saneamento e pelos agricultores. A co-compostagem, que combina lodo de esgoto com resíduos sólidos orgânicos e esterco animal, tem sido apontada como a abordagem mais eficiente para otimizar a relação carbono/nitrogênio e a qualidade agrônoma do composto final (Czekala, Drozdowski e Labiak, 2023). Avanços tecnológicos, como o uso de inoculantes microbianos e

de biocárvão (biochar) como aditivos, têm reduzido o tempo de processamento e melhorado o controle de contaminantes emergentes, ampliando a viabilidade econômica do processo (Zhang *et al.*, 2022).

A articulação entre biocompostagem (BioComt) e o modelo desenvolvido nesta Tese é direta, tal como desagregado na matriz produtiva do modelo e detalhado de forma mais abrangente no Capítulo 4. O setor aborda precisamente as atividades de compostagem derivadas dos setores de água, esgoto e resíduos sólidos, constituindo o elo entre a gestão urbana de resíduos e a produção agrícola.

### 3 PRODUÇÃO AGRÍCOLA E INSUMOS QUÍMICOS: EVIDÊNCIAS ECONOMETRICAS E APLICAÇÕES

Este capítulo tem como objetivo estimar a elasticidade do uso de fertilizantes químicos na produção agrícola, utilizando um modelo de efeitos fixos em dados em painel. A abordagem permite controlar características não observáveis específicas de cada unidade produtiva ao longo do tempo, proporcionando estimativas mais robustas da relação entre insumos e produção. A elasticidade obtida representa a sensibilidade da produção agrícola a variações no uso de fertilizantes químicos, sendo um parâmetro relevante para a calibração do modelo de equilíbrio geral computável (EGC). A inclusão dessa elasticidade no Modelo BIO-BR possibilita avaliar de forma mais realista os impactos de uma política que mantém o padrão produtivo atual de utilização de insumos químicos, permitindo simular os efeitos dessa transição sobre a produção ao longo dos anos.

#### 3.1 Metodologia da estimativa econométrica

A opção por estimar a elasticidade da produção agrícola de lavouras temporárias e permanentes (Anexo A) por meio de dados em painel, com efeitos fixos, baseia-se em critérios metodológicos. A especificação adotada utiliza uma forma funcional *log-log*, na qual a variável dependente e as variáveis explicativas contínuas são expressas em logaritmos naturais, permitindo a interpretação direta dos coeficientes estimados como elasticidades. O modelo de efeitos fixos possibilita controlar características não observáveis e invariantes ao longo do tempo, como qualidade do solo, condições climáticas médias e práticas agrícolas regionais, que poderiam introduzir viés nas estimativas.

Além disso, a abordagem de painel reduz problemas de endogeneidade ao explorar variações intraunidade ao longo do tempo, eliminando vieses provenientes de heterogeneidade não observada. A modelagem também permite maior precisão na identificação do efeito específico do insumo sobre a produção, sem a necessidade de suposições estritas sobre a função de produção agregada.

##### 3.1.1 Estimação em dados em painel

Os modelos de dados em painel têm sido amplamente utilizados e recomendados para avaliar os efeitos diversos sobre os resultados agrícolas. A principal diferença entre as análises diz respeito aos estimadores de dados em painel, que se concentram em modelar o efeito específico  $\mu_i$  da equação (1), sendo que na literatura econométrica há uma ênfase nos estimadores (modelos) de efeitos fixos. Algebricamente, o modelo de dados em painel é representado por:

$$Y_{it} = \alpha + \beta X_{it} + \delta Z_{it} + u_{it} \quad (1)$$

O componente de erro  $\mu_{it}$  da equação (1) assume a seguinte forma:

$$u_{it} = \mu_i + \epsilon_{it} \quad (2)$$

Em que  $\mu_i$  são componentes específicos e  $\epsilon_{it}$  são erros idiossincráticos. O  $\mu_i$  pode denotar, por exemplo, a qualidade do solo na função de produção agrícola. Esse tipo de modelo tem fortes propriedades de identificação e pode ser relevante no caso em que temperatura, precipitação e outros eventos climáticos variam plausivelmente ao longo do tempo (Dell; Jones; Olken, 2014; Hsiang, 2016).

No modelo de efeitos fixos, os termos  $\mu_i$  da equação (2) podem apresentar correlação com os regressores da equação (1). Esse modelo permite a endogeneidade dos regressores, desde que a correlação ocorra exclusivamente com o componente do erro que é específico da unidade e constante ao longo do tempo ( $\mu_i$ ), mas não com o termo idiossincrático  $\epsilon_i$  (Cameron; Trivedi, 2010).

Para estimar os parâmetros  $\beta$  e  $\delta$ , é fundamental considerar o componente de erro específico da unidade,  $\mu_i$ . No modelo de efeitos fixos, esse controle é realizado por meio do estimador *within*, que elimina os efeitos individuais  $\mu_i$  através de uma transformação baseada na diferenciação de médias. Esse estimador utiliza o método dos Mínimos Quadrados Ordinários (MQO) aplicados aos dados ajustados pela média. Como as variáveis que não variam ao longo do tempo possuem média diferenciada igual a zero, o termo  $\mu_i$  é removido ao subtrair o modelo original da equação correspondente às médias individuais. Dessa forma, obtêm-se estimativas consistentes de  $\beta$  e  $\delta$ , mesmo que  $\mu_i$  esteja correlacionado com os regressores do modelo.

Blanc e Schlenker (2017) destacam que, na literatura sobre modelos em painel, há uma preferência pelo uso de estimadores de efeitos fixos para avaliar a agricultura, com ênfase nos efeitos fixos de grupo.

Assim, considerando a análise central da tese e o intuito do presente capítulo, o modelo de dados em painel com efeitos fixos foi escolhido como o mais adequado para estimar a equação (3) descrita abaixo:

$$\ln Y_{it} = \alpha + \beta_n \sum_1^n \ln X_{nit} + \gamma_i + \delta_t + u_{it} \quad (3)$$

Onde:  $Y_{it}$  representa a produção no município  $i$  e no ano  $t$ ;  $\beta_n$  são os coeficientes associados a cada variável explicativa;  $X_{nit}$  representa o vetor de variáveis explicativas;  $\gamma_i$  são os efeitos fixos municipais;  $\delta_t$  são os efeitos fixos de tempo.

### 3.2 Base de dados

#### 3.2.1 Variável de uso de fertilizante químico no Brasil

A mensuração do uso de fertilizantes a nível municipal, utilizada nessa análise, foi inspirada na metodologia adotada por Dias, Rocha e Soares (2019). Os autores estimaram a aplicação do glifosato em nível municipal combinando dados de uso de pesticidas por cultura agrícola com a distribuição das áreas cultivadas nos municípios brasileiros. Para isso, utilizaram informações sobre a aplicação de glifosato<sup>3</sup>, obtidas em registros oficiais e levantamentos agrícolas, e cruzaram esses dados com a área plantada de cada cultura nos municípios, conforme informado em bases censitárias. Dessa forma, a estimativa do uso do glifosato em cada município foi derivada da multiplicação entre a área cultivada de cada cultura e a quantidade de aplicação do herbicida, permitindo capturar com maior precisão a variabilidade espacial da exposição ao pesticida.

Como os fertilizantes também não são observados em nível local, utilizou-se informações da Agência Nacional para Difusão de Adubos (ANDA) a respeito do volume de

---

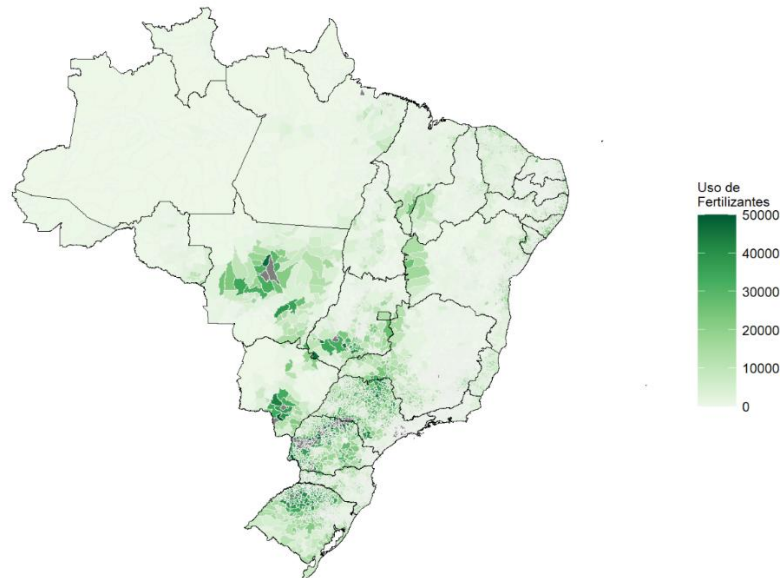
<sup>3</sup> O glifosato é um herbicida sistêmico de ação não seletiva amplamente empregado em escala global. O produto é largamente utilizado em atividades agrícolas, florestais e em áreas não agrícolas, constituindo o princípio ativo e formulações comerciais. Além disso, desempenha papel central em sistemas de plantio direto e no cultivo de variedades geneticamente modificadas tolerantes ao herbicida, a exemplo da soja e do milho.

vendas de fertilizantes, em nível estadual. A partir dessas informações, em conjunto com dados dos últimos Censos Agropecuários do IBGE (2017), calculou-se a equação (4). Esta, por sua vez, detalha a quantidade de insumos fertilizantes utilizado por município em 2006 e 2017. A equação leva em conta a área cultivada nos municípios em relação área total do país.

$$Y_{imt} = Y_{it} \frac{Area\_cultivada_{mt}}{Area\_cultivada_t} \quad (4)$$

Onde  $Y_{imt}$  é usado para representar a quantidade de fertilizantes  $i$  utilizados no município  $m$  no ano  $t$ ;  $Y_{it}$  é a quantidade total de fertilizantes  $i$  usados por estado no ano  $t$  (em toneladas);  $Area\_cultivada_{mt}$  é a área cultivada de lavouras temporárias e permanentes no município  $m$  no ano  $t$ ; e  $Area\_cultivada\_Brasil_t$  é o agregado para o país no ano  $t$ .

**Figura 7 - Estimativa de uso de fertilizantes por área a nível municipal (Ton/hectare), 2017**



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 7 apresenta a representação dos resultados da estimação feita quanto ao uso de fertilizantes, para o ano de 2017. Observa-se com a ilustração um padrão de áreas cultivadas concentrado com mais intensidade em regiões reconhecidas pelo potencial de produção de grãos, como soja e milho. Um exemplo é a região do norte do Mato Grosso, sul do Mato Grosso do Sul, grande parte dos Estados do Rio Grande do Sul e Paraná e a região do MATOPIBA.

### 3.1.2 Inclusão de variáveis climáticas

A incorporação de variáveis climáticas, como precipitação, radiação solar e temperatura, permite analisar a relação entre as condições climáticas e a produção agrícola. A presente análise baseia-se nos dados de Xavier, King e Scanlon (2017) para a estimativa das variáveis climáticas, garantindo consistência e representatividade espacial e temporal das informações utilizadas. Os autores, desenvolveram um extenso banco de dados meteorológicos diários para o Brasil, por meio da aplicação de métodos de interpolação espacial, geraram uma grade regular de informações climáticas com resolução de  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  (aproximadamente 27,75 km).

A metodologia incluiu a correção sistemática dos dados brutos para reduzir erros instrumentais. O uso de interpoladores geoestatísticos como a krigagem e regressão ponderada para garantir a consistência espacial e a consideração da altitude na distribuição das temperaturas, aplicando-se técnicas de regressão altimétrica também foram adotados. Além disso, os dados de radiação solar foram calibrados com medições de satélites meteorológicos. A validação do conjunto de dados foi feita por meio da comparação das séries temporais interpoladas com medições independentes, verificando sua precisão e coerência espacial. A principal contribuição do trabalho de Xavier, King e Scanlon (2017) foi fornecer um conjunto de dados homogêneo e de alta resolução para análises climáticas e modelagem de impactos ambientais, agrícolas e hidrológicos.

As fontes dos dados utilizada pelos autores são o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), a Agência Nacional de Águas (ANA) e o Departamento de Águas e Energia Elétrica de São Paulo (DAEE). Os dados do INMET são de estações meteorológicas que coletam todas as variáveis meteorológicas de temperatura máxima ( $^\circ\text{C}$ ), temperatura mínima ( $^\circ\text{C}$ ), radiação ( $\text{MJ m}^{-2}$ ), entre outras. Os dados da ANA e do DAEE são limitados à precipitação (mm), sendo que a ANA fornece a principal fonte de dados por meio de 2.436 estações pluviométricas (67% de todos os pluviômetros).

A utilização desses dados na presente análise econométrica traz vantagens, pois a resolução espacial e temporal permite capturar padrões regionais e sazonais dos efeitos climáticos sobre a produção agrícola nas lavouras consideradas. A granularidade dos dados facilita a detecção de impactos climáticos localizados, sendo que a integração simultânea de precipitação, temperatura e radiação solar possibilita a avaliação de seus efeitos combinados

sobre a produção agrícola. Os dados selecionados foram dos anos de 2006 e 2017, sendo que o acumulado municipal ao ano foi uma média das variáveis selecionadas.

### 3.1.3 Variáveis selecionadas

Os dados analisados têm como base os dois últimos Censos Agropecuários realizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), nos anos de 2006 e 2017, cujas informações foram disponibilizadas em nível municipal. Esses levantamentos abrangem o conjunto dos municípios brasileiros (totalizando 5.570 unidades territoriais) e reúnem dados estruturais sobre os estabelecimentos agropecuários, as atividades produtivas e o uso de fatores de produção em todo o país. As variáveis selecionadas estão detalhadas na Quadro 5.

**Quadro 5 - Variáveis relacionadas à produção agrícola, 2006 e 2017**

| Variável             | Descrição                                                                             | Unidade                   | Fonte                              |
|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|------------------------------------|
| Fertilizantes        | Quantidade estimada de uso de fertilizantes                                           | Ton/hectare área plantada | ANDA (2006;2017); IBGE (2006;2017) |
| Produção             | Quantidade produzida por área colhida                                                 | Toneladas                 | IBGE (2006;2017)                   |
| Área irrigada        | Área de estabelecimentos agropecuários com lavoura permanente e temporária            | Hectares                  | IBGE (2006;2017)                   |
| Pessoal ocupado      | Pessoal ocupado em estabelecimentos agropecuários com lavoura permanente e temporária | Número de pessoas         | IBGE (2006;2017)                   |
| Maquinário           | Estoque de máquinas agrícolas (tratores, implementos, semeadeiras e colheitadeiras)   | Número de máquinas        | IBGE (2006;2017)                   |
| Financiamento        | Estabelecimentos agropecuários que obtiveram financiamento                            | %                         | IBGE (2006;2017)                   |
| 1 a 5 anos de estudo | Produtor com 1 a 5 anos de estudo                                                     | %                         | IBGE (2006;2017)                   |

| <b>Variável</b>        | <b>Descrição</b>                                                                                | <b>Unidade</b>     | <b>Fonte</b>                  |
|------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|-------------------------------|
| 5 a 9 anos de estudo   | Produtor com 5 a 9 anos de estudo                                                               | %                  | IBGE (2006;2017)              |
| 10 a 13 anos de estudo | Produtor com 10 a 13 anos de estudo                                                             | %                  | IBGE (2006;2017)              |
| Nível superior         | Produtor com nível superior de estudo                                                           | %                  | IBGE (2006;2017)              |
| Plantio Direto         | Estabelecimentos que utilizaram a técnica de plantio direto na palha                            | %                  | IBGE (2006;2017)              |
| Cultivo mínimo         | Estabelecimentos que utilizaram a técnica de cultivo mínimo                                     | %                  | IBGE (2006;2017)              |
| Cultivo convencional   | Estabelecimentos que utilizaram a técnica de cultivo convencional                               | %                  | IBGE (2006;2017)              |
| Semente Transgênica    | Área dos estabelecimentos de lavoura permanente e temporária que utilizaram semente transgênica | Hectares           | IBGE (2006;2017)              |
| Orientação técnica     | Estabelecimentos que receberam orientação técnica                                               | %                  | IBGE (2006;2017)              |
| Precipitação           | Precipitação média anual                                                                        | mm                 | Xavier, King e Scanlon (2017) |
| Radiação Solar         | Radiação solar média                                                                            | MJ m <sup>-2</sup> | Xavier, King e Scanlon (2017) |
| Temperatura Máxima     | Temperatura máxima – média anual                                                                | °C                 | Xavier, King e Scanlon (2017) |
| Temperatura Mínima     | Temperatura mínima – média anual                                                                | °C                 | Xavier, King e Scanlon (2017) |

Fonte: Elaborado pela autora.

Considerando a Tabela 1 tem-se que entre os anos de 2006 e 2017, a produção para todos os municípios do Brasil apresentou um crescimento, passando de 581,8 para 949,3 milhões de toneladas. Esse aumento pode estar relacionado à adoção de novas tecnologias, melhorias no manejo produtivo e possíveis expansões da área cultivada em diversas regiões do

país. O número médio de pessoas ocupadas na atividade agrícola cresceu levemente, de 2.986 para 3.155, sugerindo uma estabilidade na demanda por mão de obra, mesmo diante da adoção de tecnologias que poderiam reduzir a necessidade de trabalhadores. Um dado relevante nesse contexto é o aumento no número médio de máquinas agrícolas, que passou de 362 para 978, o que reflete um aumento na mecanização agrícola, corroborando com análises como o de Silva, Baricelo e Vian (2020), que também destacam o processo de evolução do maquinário na produção agrícola no Brasil.

**Tabela 1 - Média das variáveis adotadas na análise, 2006 e 2017**

| <b>Média</b>                 |                          |             |             |
|------------------------------|--------------------------|-------------|-------------|
|                              | <b>Unidade de medida</b> | <b>2006</b> | <b>2017</b> |
| Produção                     | Milhões/Ton              | 582         | 949         |
| Pessoal ocupado              | Número                   | 2.986       | 3.155       |
| Maquinário                   | Número                   | 362         | 978         |
| Financiamento                | %                        | 45          | 40          |
| 1 a 5 anos de escolaridade   | %                        | 49          | 36          |
| 5 a 9 anos de escolaridade   | %                        | 11          | 18          |
| 10 a 13 anos de escolaridade | %                        | 10          | 17          |
| Nível superior               | %                        | 5           | 9           |
| Plantio direto na palha      | %                        | 12          | 17          |
| Cultivo mínimo               | %                        | 14          | 20          |
| Cultivo convencional         | %                        | 22          | 26          |
| Semente transgênica          | %                        | 799         | 4.221       |
| Orientação técnica           | %                        | 30          | 19          |
| Precipitação                 | mm                       | 1.313       | 1.354       |
| Radiação Solar               | MJ m <sup>-2</sup>       | 18          | 18          |
| Temperatura máxima           | °C                       | 29          | 29          |
| Temperatura mínima           | °C                       | 18          | 18          |

Fonte: Elaboração própria com base nos dados do IBGE (2006; 2017)

Em termos de financiamento, observou-se uma redução no percentual médio de produtores que acessam crédito agrícola, passando de 45% para 40%. Esse declínio pode estar relacionado a mudanças nas políticas de financiamento, a um menor interesse dos produtores

por crédito ou até mesmo a uma maior autossuficiência financeira do setor agrícola em diversas regiões, especialmente em grandes estabelecimentos agrícolas.

A qualificação da mão de obra agrícola também apresentou avanços em âmbito nacional. O percentual médio de produtores com apenas 1 a 5 anos de escolaridade caiu de 49% para 36%, enquanto aqueles com 5 a 9 anos aumentaram de 11% para 18%. Da mesma forma, houve crescimento na média de produtores com 10 a 13 anos de escolaridade (de 10% para 17%) e com nível superior (de 5% para 9%). Esses dados sugerem uma melhoria no nível educacional do setor, fator que pode contribuir para a adoção de novas práticas produtivas e gestão mais eficiente dos estabelecimentos em diferentes partes do país.

No que se refere às práticas agrícolas, verificou-se um aumento na adoção média do plantio direto na palha, que passou de 12% para 17%, e do cultivo mínimo, que cresceu de 14% para 20%. Ambas as práticas estão associadas a benefícios como maior conservação do solo e redução da erosão. No entanto, o cultivo convencional também aumentou, passando de 22% para 26%, indicando que uma parcela significativa dos produtores ainda mantém práticas tradicionais de manejo do solo.

Outro destaque relevante é o crescimento expressivo no uso médio de sementes transgênicas, cujo área saltou de 799 para 4.221 hectares. Esse aumento reflete a consolidação da biotecnologia no setor agrícola brasileiro, permitindo maior resistência a pragas e um possível ganho de produção. Por outro lado, observou-se uma redução na média de produtores que recebem orientação técnica, com o percentual de assistência caindo de 30% para 19%. Essa queda pode indicar menor oferta de suporte técnico ou uma menor procura por parte dos agricultores, o que pode gerar desafios na disseminação de inovações tecnológicas e boas práticas agrícolas.

Por fim, as variáveis climáticas médias para todos os municípios do Brasil apresentaram pouca variação ao longo do período. A precipitação teve um leve aumento, passando de 1.313 mm para 1.354 mm, enquanto a radiação solar e as temperaturas máxima e mínima permaneceram constantes. Esse cenário sugere que fatores climáticos não exerceram influência significativa nas mudanças observadas na produção agrícola em nível nacional.

### **3.3 Resultados**

Apresentam-se, nesta seção, os resultados da estimação da função de produção agrícola, com especial atenção à elasticidade associada ao uso de fertilizantes químicos, posteriormente

incorporada ao modelo de equilíbrio geral computável. A produção captada por essa elasticidade é relevante para a compreensão do comportamento produtivo ao longo do tempo, tanto sob a manutenção do padrão atual de uso de insumos quanto em cenários nos quais os bioinsumos passam a ter maior participação no processo produtivo.

Para a análise econométrica que aqui se propôs, foram estimados 3 modelos distintos. No modelo intitulado simples, foi estimada uma regressão linear em que a variável dependente é a produção e a variável explicativa é a intensidade no uso de fertilizante. Entretanto, como a variável explicativa de interesse pode estar correlacionada com fatores não especificados no modelo simples, podendo enviesar as estimativas deste modelo, no modelo Padrão foram incluídas variáveis comumente usadas como *proxies* de capital e trabalho em estudos que estimam funções de produção agrícolas. Por fim, seguiu-se com a estimação de um modelo estendido, onde são incluídos outros determinantes da produção agrícola. Esta inclusão auxilia na identificação da relação entre ambos, ao serem considerados outros fatores correlacionados com a produção e que estavam sendo omitidos nos modelos anteriores. Desta forma, este último modelo fornece as estimativas mais confiáveis da relação entre uso de fertilizantes químicos e produção agrícola.

Os três modelos estimados via efeitos fixos em dados de painel revelam que o impacto dos fertilizantes químicos sobre a produção agrícola é positivo e estatisticamente significativo, mas decrescentes conforme novas variáveis são incluídas, como evidenciado na Tabela 2. No modelo simples, a elasticidade da produção em relação ao uso de fertilizantes é de 0,28, sugerindo que um aumento de 1% no uso de fertilizantes químicos está associado a um crescimento de 0,28% na produção. No modelo padrão, que inclui a mecanização representando o capital e pessoal ocupado representando o trabalho, essa elasticidade reduz-se para 0,147. Assim, um aumento de 1% no uso de fertilizantes químicos está associado a um crescimento de 0,147% na produção.

Já no modelo estendido, que controla também por fatores climáticos, capital humano, manejo do solo e de financiamento, uma elevação de 1% no uso de fertilizantes químicos estaria associada a um crescimento de 0,050% na produção. Essa redução na elasticidade ao longo das especificações sugere que parte do efeito inicialmente atribuído aos fertilizantes químicos era, na verdade, capturado por outras variáveis omitidas nos modelos mais simples.

**Tabela 2 - Estimativas dos parâmetros da função de produção, 2006/2017**

|                          | <b>Simple</b>                  | <b>Padrão</b>                | <b>Estendida</b>             |
|--------------------------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|
|                          | <b>(1)</b>                     | <b>(2)</b>                   | <b>(3)</b>                   |
| log_fertilizante         | 0.280***<br>(0.003)            | 0.140***<br>(0.003)          | 0.050*<br>(0.003)            |
| log_Precipitação         |                                |                              | -0.268***<br>(0.043)         |
| log_Tratores_implem      |                                | -0.169***<br>(0.007)         | -0.050**<br>(0.012)          |
| log_Pessoal_ocupado      |                                | 0.151***<br>(0.024)          | 0.052**<br>(0.025)           |
| log_Area_irrigada        |                                |                              | 0.023***<br>(0.007)          |
| log_Rad                  |                                |                              | -0.630**<br>(0.265)          |
| log_Orient_Tec           |                                |                              | 0.029***<br>(0.011)          |
| log_Superior             |                                |                              | 0.084***<br>(0.020)          |
| log_Escol_10_a_13        |                                |                              | 0.027<br>(0.027)             |
| log_Escol_5_a_9          |                                |                              | -0.0001<br>(0.014)           |
| log_Escol_1_a_5          |                                |                              | -0.084***<br>(0.017)         |
| log_transgenicos         |                                |                              | 0.029***<br>(0.006)          |
| log_T_min                |                                |                              | 0.873***<br>(0.264)          |
| log_T_max                |                                |                              | 0.554<br>(0.508)             |
| log_Direto_palha         |                                |                              | -0.001<br>(0.008)            |
| log_Cultivo_mínimo       |                                |                              | -0.035***<br>(0.009)         |
| log_Cultivo_convencional |                                |                              | -0.024***<br>(0.011)         |
| log_Financ               |                                |                              | 0.010**<br>(0.004)           |
| <i>Observações</i>       | 11.132                         | 11.132                       | 11.068                       |
| <i>R<sup>2</sup></i>     | 0.015                          | 0.108                        | 0.165                        |
| <i>Estatística F</i>     | 86.045***<br>(df = 1;<br>5561) | 224.931*** (df = 3;<br>5559) | 60.187*** (df = 18;<br>5485) |

Notas: \*p<0.1; \*\*p<0.05; \*\*\*p<0.01

Salienta-se que a estimação da função de produção agrícola foi realizada a partir de um modelo de dados em painel com efeitos fixos individuais e efeitos fixos de tempo. Essa especificação implica que os coeficientes estimados são identificados exclusivamente a partir das variações intraunidade e intratemporais, ou seja, a partir de mudanças ocorridas dentro de um mesmo município ao longo do tempo, após a remoção de fatores invariantes no tempo e de choques comuns a todos os municípios em cada período. Nesse contexto, os parâmetros não

refletem diferenças estruturais entre municípios, mas sim a resposta da produção a variações marginais nos fatores produtivos dentro de uma mesma unidade espacial.

Dada essa forma de identificação, a ocorrência de coeficientes com sinal negativo não deve ser interpretada como um resultado anômalo. Em modelos com efeitos fixos em dois níveis, o sinal e a magnitude dos coeficientes dependem da covariância residual entre a variável explicativa e a variável dependente após a eliminação dos componentes fixos individual e temporal. Assim, coeficientes negativos podem emergir quando aumentos de determinados insumos, no interior de um mesmo município e ao longo do tempo, estão associados a períodos de menor desempenho produtivo relativo, seja por ajustes tecnológicos, mudanças na combinação de fatores ou por respostas endógenas a choques não observados. Esses resultados são, portanto, consistentes com a estrutura do modelo adotado e com a interpretação estritamente “*within*” das elasticidades estimadas.

Considerando o resultado estimado nesse capítulo, podemos selecionar alguns resultados encontrados em outros trabalhos, como orientadores de análise. Nascimento *et al* (2017), fizeram estimativas a partir da função fronteira de produção estocástica e função de produção média (MQO) analisando propriedades cafezeiras de Minas Gerais. Os resultados apontaram para uma elasticidade de produção do fator “gastos com fertilizantes de solo” de 0,742 utilizando a função de fronteira e 0,717 para a função MQO, ou seja, um aumento de 1% nos gastos com fertilizantes provocaria um aumento de até 0,74% no valor da produção ao ano.

Já o trabalho de Ogino e Gasques (2023) analisou as relações entre as variáveis preço de importação dos fertilizantes minerais, quantidade entregue de fertilizantes, área plantada, quantidade agrícola produzida e atratividade das cinco commodities agrícolas mais exportadas durante os anos de 1990 a 2021, por meio do modelo SVEC. Os resultados identificaram que um aumento de 1% na quantidade de fertilizantes entregues ao produtor aumenta a quantidade produzida inicialmente em 1,73% ao ano.

Os resultados encontrados para a elasticidade do uso de fertilizantes, onde o aumento de 1% do uso de fertilizante eleva a produção em 0,05%, parece adequado quando se considera a abrangência da análise realizada, que incluiu um número maior de culturas agrícolas, tanto de lavouras temporárias quanto permanentes. Os trabalhos citados de Lima *et al.* (2017) e Ogino e Gasques (2023), apresentam elasticidades mais elevadas, porém, esses estudos focam em contextos específicos de culturas de grande relevância no cenário produtivo brasileiro, especialmente por se tratar de *commodities* agrícolas.

Desse modo, esse coeficiente será incorporado ao modelo de equilíbrio geral computável (EGC) na forma de elasticidade do efeito da variação no uso de fertilizantes químicos sobre a produção da terra. A partir disso, busca-se avaliar os impactos macroeconômicos e setoriais associados ao uso de fertilizantes químicos sobre a produção agrícola e no preço dos alimentos, bem como as possibilidades de variação no emprego desse insumo frente à introdução dos bioinsumos, tendo como pano de fundo o Plano Nacional de Fertilizantes e a Política Nacional de Bioinsumos. O aprofundamento da equação e maiores detalhes acerca dessa especificação podem ser consultados no Capítulo 4 desta Tese.

#### 4 MODELO BIO-BR

Este capítulo apresenta o detalhamento do modelo de Equilíbrio Geral Computável (EGC), adaptado para analisar os efeitos econômicos associados à expansão do setor de bioinsumos no Brasil, e do marco regulatório (Lei nº 15.070 de dezembro de 2024) da Política Nacional de Bioinsumos (PNB). Esse modelo, genericamente denominado Modelo Brasileiro de Bioinsumos (BIO-BR, do inglês *Brazilian Bioinputs Model*), utilizou como base o modelo BIM-T (Betarelli Junior *et al.*, 2022; Betarelli Junior, 2022; Betarelli Junior, 2023), sendo alterado de modo a captar os efeitos associados aos bioinsumos. Ressalta-se que a presente Tese realizou duas adaptações específicas no modelo: (a) abertura dos setores de bioinsumos a partir dos setores “mãe” da Matriz de Insumo Produto (MIP) e (b) simulação de alternativas para o orçamento público, que compõem cenários possíveis para o estímulo ao setor de bioinsumos no Brasil.

A adaptação foi elaborada para avaliar políticas de subsídios à expansão da oferta de bioinsumos sob diferentes cenários fiscais e sob choques de produção da terra decorrentes do uso crescente de bioinsumos na agricultura, bem como os impactos sistêmicos sobre produção, preços relativos e renda das famílias. O modelo BIO-BR segue uma arquitetura baseada no ORANI-G/ORANG-RD, incorporando mecanismos intertemporais que contabiliza variações de oferta de bioinsumos como resultado de políticas de subsídios para estímulo ao setor.

Semelhante ao modelo PHILGEM-RD, o BIO-BR adota uma Matriz de Contabilidade Social (MCS) calibrada para o ano de 2015, permitindo capturar fluxos de renda, interações intersetoriais e pagamentos entre agentes econômicos, bem como representar de forma integrada os fluxos circulares de renda entre atividades produtivas, fatores de produção, instituições e famílias, capturando simultaneamente os efeitos diretos, indiretos e induzidos das políticas de subsídios. Além disso, adoção de uma abordagem com dinâmica recursiva justifica-se devido à necessidade de captar os efeitos intertemporais associados à produção e adoção gradual de bioinsumos para agricultura. Diferentemente da estática comparativa, que compara apenas equilíbrios antes e depois de um choque, a dinâmica recursiva permite acompanhar a trajetória de ajuste da economia ao longo do tempo, incorporando a acumulação de estoques e seus impactos sobre produção, renda e consumo. Dessa forma, o modelo possibilita avaliar não apenas o resultado do choque, mas também o processo de transição condicionado pela política e regime fiscal selecionados, aspecto central para a análise proposta na tese. (Betarelli Junior *et al.*, 2022; Betarelli Junior, 2022; Betarelli Junior, 2023)

A matriz apresenta detalhamento para 10 famílias representativas por faixa de renda, contemplando tanto seus perfis de consumo quanto suas fontes de rendimento, incluindo remuneração do trabalho, renda da terra, capital e transferências. A adoção de uma MCS desagregada por famílias é particularmente adequada para avaliar os impactos distributivos associados a choques de produção decorrentes da substituição/complementação parcial de insumos químicos por bioinsumos, uma vez que permite rastrear como alterações na estrutura produtiva agrícola afetam a geração e a apropriação da renda ao longo do tempo. Nesse contexto, mudanças tecnológicas na agricultura (ao influenciar a produtividade do trabalho e da terra, bem como a demanda por insumos intermediários) repercutem de forma diferenciada sobre os estratos de renda, modificando os padrões de consumo, o bem-estar das famílias e a própria dinâmica de sobreprodução relativa de renda capturada pelo modelo. Assim, a abertura da MCS em múltiplas famílias amplia a capacidade analítica da tese ao integrar, em um mesmo arcabouço, os efeitos produtivos, distributivos e intertemporais da transição para sistemas agrícolas mais intensivos em bioinsumos.

Como a agricultura é intensiva em trabalho e depende do uso da terra como fator produtivo específico, a MCS permite, desse modo, associar a geração de valor e renda agrícola à remuneração conjunta desses fatores e à sua apropriação pelas diferentes classes de famílias. Esse arcabouço possibilita analisar como os ganhos de produção decorrentes da adoção de bioinsumos se traduzem, ao longo do tempo, em variações na renda e nos padrões de consumo dos distintos estratos de renda.

O modelo BIO-BR torna-se necessário devido a necessidade de maior compreensão econômica sobre a difusão dos bioinsumos na atividade agrícola, no limiar de um novo arranjo produtivo, com cadeias de suprimentos, processos industriais e relações tecnológicas distintas das tradicionais. A produtividade da terra resultante do uso de insumos biológicos (e orgânicos) altera a composição de custos, modifica incentivos de produção e interfere nos padrões de demanda por insumos químicos. Desse modo, a estrutura de equilíbrio geral é capaz de capturar simultaneamente (i) o efeito de política de subsídios ao setor de bioinsumos; (ii) as repercussões sobre os setores relacionados; e (iii) as mudanças nos preços relativos e no consumo das famílias. Como demonstram Banarda (1991), Horridge *et al.* (1996) e Devarajan & Robinson (2005), a modelagem EGC é adequada para avaliar políticas públicas que envolvem reestruturações tecnológicas extensas e efeitos cruzados entre mercados, características centrais da transição para o uso ampliado de bioinsumos no Brasil.

Assim, este capítulo se organiza em cinco seções. A primeira apresenta os fundamentos gerais da abordagem EGC e a forma como o modelo BIO-BR se insere nesse escopo. A segunda seção apresenta os estudos aplicados à insumos agrícolas com modelos de EGC e equilíbrio parcial. A terceira seção descreve a estrutura teórica do modelo BIO-BR. A quarta seção detalha a dinâmica recursiva. A quinta seção descreve os parâmetros e dados utilizados na calibração, com destaque para produtividade, elasticidades e coeficientes. Por fim, a seção seis explica a abertura do setor de bioinsumos, sua desagregação estrutural e a forma como se modela seu papel na matriz produtiva.

#### 4.1 Modelos de EGC e características gerais do modelo BIO-BR

Os modelos de Equilíbrio Geral Computável (EGC) têm sido uma ferramenta importante para análise de impacto econômico, além de serem amplamente utilizados na avaliação de efeitos de reformas econômicas e ajustes estruturais, abordando questões nos mais diversos campos de especialização, como políticas fiscais, políticas de energia, uso da terra, dentre outros temas. Tais modelos são empregados também na mensuração dos efeitos de choques nas condições econômicas e sociais de um país, especialmente na estrutura de seus setores produtivos e na distribuição de renda (Domingues, 2002; Betarelli Junior, 2013; Santiago, 2014; Betarelli Junior *et al.*, 2021).

Tradicionalmente, a aplicação de modelos EGC acompanha uma estrutura teórica de equilíbrio geral *walrasiano*. Os pressupostos assumidos são de que as firmas são minimizadoras de custos, as famílias maximizadoras de utilidade e existe o equilíbrio automático dos mercados (*market cleaning*). A aplicação computacional segue a base de duas escolas: norueguesa/australiana com a abordagem de Johansen (1960) e americana com trabalhos de Scarf (1967; 1973). A primeira escola trabalha, em sua estrutura matemática, com um conjunto de equações linearizadas, enquanto a escola americana utiliza um sistema de equações não linearizadas. Cabe destacar que modelos EGC que incluem a dimensão tempo em suas análises, ou seja, a dinâmica de acumulação intertemporal em variáveis como estoque de capital é chamada modelos EGC dinâmicos recursivos. Tais modelos partem da hipótese de expectativas estáticas de forma que a solução de cada ano depende do ano corrente e dos anos anteriores (Dixon; Rimmer, 2002).

A formalização dos modelos de EGC articula produção, consumo e o fluxo circular da renda por meio de um sistema integrado, permitindo representar as interações entre os agentes

econômicos. Quando esses fundamentos teóricos são associados a dados concretos da economia, usualmente provenientes de Matrizes de Contabilidade Social (MCS), conforme destacado por Wing (2004), torna-se possível transformar a estrutura abstrata dos modelos de equilíbrio geral em representações aplicadas a uma economia real. Nessa construção, são derivadas funções de demanda para cada bem, cujas somas definem a demanda agregada, caracterizada por propriedades como continuidade, não negatividade, homogeneidade de grau zero e conformidade com a Lei de Walras, segundo Shoven e Whalley (1992). Do lado da produção, supõe-se que as firmas operam sob tecnologias de retornos constantes ou não crescentes à escala, perseguindo a maximização de seus lucros. A implicação direta dessas propriedades (homogeneidade zero das demandas e linearidade dos lucros nos preços) é que somente os preços relativos importam, tornando irrelevante qualquer nível absoluto de preços para a determinação do equilíbrio.

Segundo Robinson (1989), a estrutura neoclássica típica desses modelos pressupõe quatro elementos centrais: (i) delimitação dos agentes representativos, ou seja os consumidores e firmas cujas decisões serão analisadas; (ii) definição das regras comportamentais, como a busca por maximização de utilidade ou de lucros; (iii) compreensão de que tais agentes respondem exclusivamente aos sinais que conseguem observar, sendo os preços os sinais fundamentais em modelos de inspiração walrasiana; e (iv) especificação do ambiente competitivo, geralmente assumido como perfeitamente competitivo, no qual cada agente atua como tomador de preços. Com essas premissas, Bandara (1991) argumenta que é possível formular um conjunto de equações simultâneas cujo resultado é a solução de equilíbrio.

Conforme argumentam Dixon e Parmenter (1996), a rápida difusão dos modelos de EGC a partir dos anos 1970 está associada a dois fatores centrais. Em primeiro lugar, a economia mundial experimentou choques simultâneos de grande magnitude, como o abrupto encarecimento das *commodities* energéticas após a crise do petróleo de 1973, mudanças profundas no arranjo monetário internacional e um crescimento expressivo dos salários reais, que não encontravam explicação satisfatória nos instrumentos econométricos tradicionais. Em segundo lugar, houve uma evolução na capacidade dos modelos em lidar com detalhes estruturais, impulsionada pelo avanço computacional e pela ampliação do volume e da qualidade dos dados disponíveis, juntamente com o surgimento de softwares especializados, como o GEMPACK. Desse modo, a modelagem EGC ganhou espaço ao oferecer mecanismos para simular choques inéditos e analisar seus efeitos em contextos em que não existia histórico empírico.

Assim, os modelos de equilíbrio geral passaram a ser aplicados a uma multiplicidade de temas, como já salientado, abrangendo desde setores produtivos, mercados de trabalho, educação e distribuição de renda até meio ambiente e bem-estar social, tanto em escalas global, quanto nacional e inter-regional (Dixon; Parmenter, 1996; Domingues, 2002). Um marco desse movimento foi a criação do modelo ORANI, desenvolvido por Dixon *et al.* (1982). Tratava-se de um modelo multissetorial, alicerçado na tradição de Johansen, construído para avaliar efeitos de diferentes políticas econômicas sobre a economia australiana. Essa versão original incluía 115 commodities, 113 setores e nove categorias ocupacionais, assumindo flexibilidade do fator trabalho entre setores e capital fixo. Como modelo estático, suas análises eram separadas em curto e longo prazo, dependendo do fechamento adotado: no curto prazo, a taxa de retorno do capital era endógena e o estoque de capital exógeno, e a configuração se invertia no horizonte de longo prazo.

Entretanto, o ORANI possuía limitações importantes, especialmente por restringir-se à análise comparativa de dois pontos no tempo. Para superar esse problema, foram desenvolvidas versões dinâmicas que introduziam mecanismos intertemporais, como o MONASH (Adams; Parmenter, 1994; Adams *et al.*, 1994), que incorporou uma estrutura dinâmica mais sofisticada, possibilitando previsões anuais desagregadas e acompanhando trajetórias de variáveis associadas ao ciclo econômico projetado externamente. Os aprimoramentos desse modelo incluíram tanto os mecanismos de acumulação, como o de capital físico, ativos e passivos financeiros, ajustes defasados, quanto a ampliação das opções de fechamento, que passaram a incluir cenários históricos, decomposições, projeções e políticas (Dixon; Rimmer, 2002).

As versões dinâmicas do modelo ORANI (especialmente o MONASH) foram concebidas originalmente para representar a economia australiana, incorporando mecanismos de acumulação e ajustes intertemporais. Com o objetivo de tornar essa estrutura metodológica acessível a outros países, Horridge *et al.* (1998) desenvolveram o ORANI-G, uma formulação genérica do modelo, projetada para permitir adaptações a diferentes bases de dados nacionais. Essa versão dispõe ainda de um desdobramento recursivo, o ORANIG-RD, no qual a dinâmica temporal é representada por funções explícitas de acumulação de capital ao longo de um horizonte, constituindo uma simplificação operacional do aparato intertemporal do MONASH (Horridge; Parmenter; Pearson, 1998). Um segundo desenvolvimento, o PHILGEM-RD, retém essa estrutura recursiva ao mesmo tempo em que preserva os avanços da família PHILGEM (Corong, 2014).

Desde então, o ORANI e suas derivações tornaram-se referência na construção de modelos de equilíbrio geral ao redor do mundo. No caso brasileiro, sua influência é evidente em uma série de modelos aplicados a diferentes agendas de política econômica. Entre eles destaca-se o PAPA, voltado à análise de políticas agrícolas (Guilhoto, 1995); o B-MARIA, orientado para examinar impactos regionais de políticas macroeconômicas (Haddad, 1999); o SPARTA, empregado para avaliar efeitos da liberalização tarifária no contexto da ALCA (Domingues, 2002); o MIBRA, concebido para projeções macroeconômicas e avaliações de políticas intertemporais (Guilhoto; Hasegawa; Lopes, 2002); o BRIDGE, utilizado para investigar os efeitos da crise de 2009 sobre a economia brasileira (Domingues *et al.*, 2010); e o BIM-T, apropriado para políticas relacionadas ao setor de transportes em um ambiente de retornos crescentes de escala e competição imperfeita (Betarelli Junior, 2013). Os dois últimos incorporam explicitamente a dinâmica intertemporal, representando uma evolução em relação às primeiras aplicações estáticas.

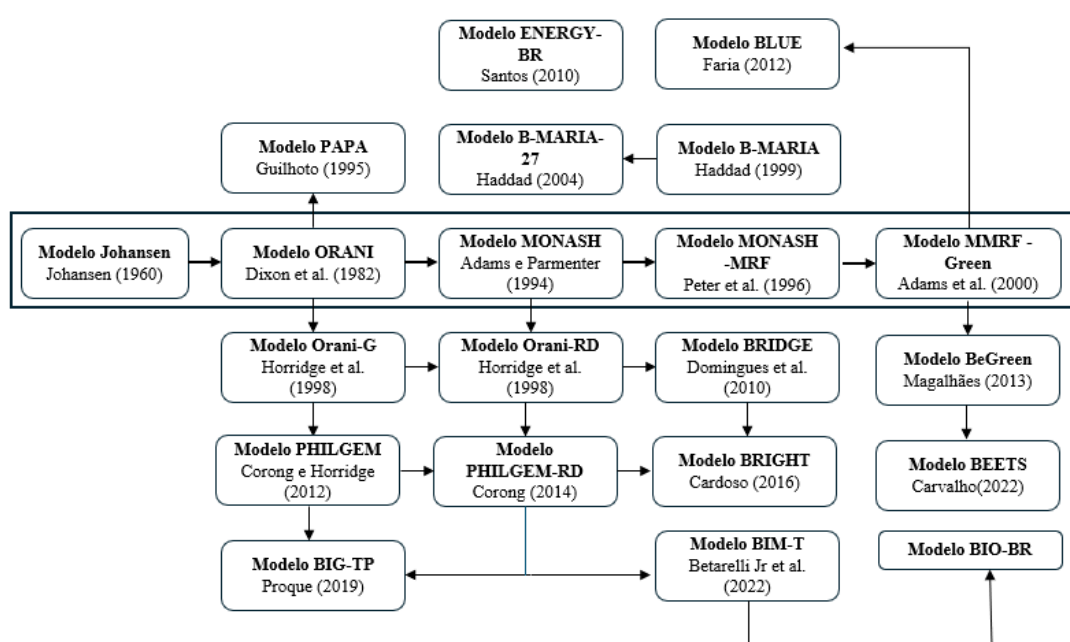
Além das aplicações em política econômica, a literatura brasileira desenvolveu modelos com foco ambiental, ampliando a interface entre EGC e sustentabilidade. Entre eles, o ENERGY-BR, destinado à avaliação de impactos regionais de reformas tarifárias no setor elétrico (Santos, 2010); o BLUE, que introduz uma representação detalhada do uso da terra e permite explorar políticas que afetam direta ou indiretamente sua disponibilidade (Faria, 2012); o BeGreen, voltado à análise de políticas climáticas, emissões de GEE e eficiência energética (Magalhães, 2013); o REGIA, desenvolvido para a Amazônia Legal, com módulo específico de mudança indireta do uso da terra (Carvalho, 2014); e o BEETS, orientado à mensuração dos efeitos econômicos de mecanismos de precificação de carbono (Carvalho, 2022).

Paralelamente aos avanços na dimensão temporal, a modelagem de equilíbrio geral também evoluiu para capturar a heterogeneidade espacial das economias. Nesse contexto surgiram os modelos inter-regionais de EGC, derivados do ORANI. Um exemplo é o MONASH-MRF, um modelo dinâmico multirregional que representa a Austrália dividida em oito regiões, cada qual com seu próprio módulo ORANI interconectado (Peter *et al.*, 1996). Uma expansão posterior, o MMRF-Green, incorporou um módulo ambiental completo, permitindo rastrear emissões de GEE por agente e região e determinar de forma endógena preços de carbono (Adams; Horridge; Parmenter, 2000).

Outra evolução importante diz respeito à incorporação de múltiplas famílias e de informações provenientes de MCS, o que foi viabilizado pela extensão proposta por Corong e Horridge (2012) para a economia das Filipinas. Assim surgiu o PHILGEM, cuja primeira versão

é estática e combina as relações típicas da análise insumo-produto com um tratamento mais detalhado da distribuição de renda entre famílias, governo e setor externo. O modelo passou a permitir analisar simultaneamente como o sistema econômico gera, distribui e realoca renda em resposta a políticas e choques estruturais (Corong; Horridge, 2012; Betarelli Junior *et al.*, 2021). Destaca-se também o BRIDGE-POP (Santiago, 2014), é um modelo habilitado para investigar as possíveis consequências econômicas do processo de envelhecimento da população.

**Figura 8 - Principais modelos e desenvolvimento histórico do modelo BIO-BR**



Fonte: Elaboração própria

O modelo BRIGHT de Cardoso (2020), com especificação teórica baseada no PHILGEM, analisou duas políticas de distribuição de renda: o Programa Bolsa Família e a tributação sobre lucros e dividendos. Já o modelo BR-TAM de Vale (2018) também incorporou as extensões propostas por Corong e Horridge (2012), com a finalidade de examinar os efeitos da integração comercial do Brasil com União Europeia e com os Estados Unidos. O BIG-TP de Proque (2019) avaliou políticas públicas de transporte terrestre de passageiros, realizando especificamente cinco aplicações envolvidas com os efeitos redistributivos e econômicos da Contribuição de Intervenção no Domínio Econômico (CIDE).

Uma vez apresentada a evolução teórica dos modelos EGC e suas principais aplicações na literatura, torna-se pertinente situar as bases metodológicas que orientam a presente pesquisa. Nesse sentido, a Figura 8 apresenta os principais modelos de abordagem da escola australiana (Johansen, 1960), com destaque para aqueles que inspiraram o desenvolvimento do BIM-T (Betarelli Jr., 2013, 2022; Betarelli Jr *et al*, 2023), que foi usado como base para adaptação do BIO-BR.

#### **4.2 Estudos aplicados à insumos agrícolas com modelos de EGC e equilíbrio parcial**

No contexto desta Tese, destaca-se discussões sobre a estratégia “*Farm to Fork*”, que se tornou uma das políticas mais avaliadas e debatidas por estudos baseados tanto em modelos de Equilíbrio Geral quanto em modelos de Equilíbrio Parcial, dada sua forte ênfase em alterações no uso de insumos químicos e seus efeitos sobre a produtividade da terra e segurança alimentar a curto e longo prazo. Alinhada à Agenda 2030 da ONU e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), a estratégia estabelece diretrizes para a gestão sustentável do solo e integra um movimento internacional mais amplo de transição para sistemas alimentares sustentáveis (ONU, 2015).

Essa estratégia propõe, entre outros objetivos, a redução até 2030 de 20% no uso de fertilizantes, 50% de agrotóxicos e uma diminuição de perdas de nutrientes em pelo menos 50% (Montanarella e Panagos, 2021). Os impactos da aplicação da estratégia podem ser relevantes em termos de produção agrícola, segurança alimentar, uso de recursos naturais (uso da terra, água) e uso de insumos químicos, bem como efeitos socioeconômicos e de caráter ambiental nos territórios rurais. Desse modo, a estratégia faz-se relevante no sentido de considerar os vários aspectos envolvidos sobre o uso dos recursos naturais atrelados ao processo produtivo (Balezantis *et al.*, 2020; Malek e Verburg, 2020).

Dentre os trabalhos, pode-se destacar Beckman *et al.* (2020), que mostraram que as estratégias “*Farm to Fork*” e de Biodiversidade da Comissão Europeia, ao reduzirem insumos agrícolas, levariam a uma queda de 7% a 12% na produção da UE e aumentariam os preços globais dos alimentos entre 9% (adoção apenas pela UE) e 89% (adoção global). As simulações utilizando o modelo GTAP-AEZ indicam perda de bem-estar mundial entre US\$ 96 bilhões e US\$ 1,1 trilhão, conforme o grau de adesão internacional. Os autores estimaram ainda que a insegurança alimentar aumentaria em 22 milhões a 185 milhões de pessoas nas regiões mais vulneráveis.

O relatório do Joint Research Centre da Comissão Europeia (2020) mostrou que a implementação ambiciosa das metas do “*Farm to Fork*” gera reduções de emissões e melhora ambiental, mas implica queda na produção agrícola da UE e variações de preços e renda. Os autores indicaram que esses impactos poderiam ser reduzidos em cerca de um quinto quando consideradas as reformas da nova Política Agrícola Comum (PAC). O estudo destacou ainda que os efeitos positivos totais são subestimados pelos limites do modelo (CAPRI) e reforça a necessidade de instrumentos adicionais e soluções globais para acelerar a transição para sistemas alimentares sustentáveis.

O estudo de Bremmer *et al.* (2021) analisou os impactos de quatro cenários sobre a produção agrícola. Os autores utilizaram o modelo AGMEMOD para simular quatro metas centrais das estratégias “*Farm to Fork*” e de Biodiversidade. Para os propósitos desta pesquisa, os resultados mais relevantes são os do segundo cenário, que pressupõe redução de 50% nas perdas de nutrientes e diminuição de 20% no uso de fertilizantes. Os resultados mostram que, sob esse cenário, a produção de culturas agrícolas poderia cair em mais de 15%, enquanto os preços tenderiam a aumentar em até 20%. Consequentemente, o impacto negativo total sobre o valor da produção pode alcançar aproximadamente 92 bilhões de euros.

Cortignani, Buttinelli e Dono (2022) analisaram efeitos do uso de insumos químicos na agricultura italiana. Os autores avaliaram uma série de indicadores econômicos, ambientais e sociais, calculados a partir dos dados do Farm Accountancy Data Network (FADN), utilizando o modelo AGRITALIM. Os resultados apontam para impactos socioeconômicos e produtivos negativos no conjunto do território nacional, embora algumas regiões, sistemas de produção e propriedades de menor porte tenha sido desproporcionalmente mais afetadas. Apesar disso, verificou-se uma melhora na sustentabilidade ambiental da produção agrícola, expressa pela redução no uso de insumos químicos (Cortignani, Buttinelli e Dono, 2022).

Além disso, a transição para uma economia neutra em carbono tende a gerar não apenas impactos econômicos, mas também efeitos sociais relevantes, incluindo possíveis perdas de bem-estar. No estudo de Henning e Witzke (2021), elaborado com o modelo CAPRI, os autores estimaram que a implementação da Estratégia “*Farm to Fork*” pode acarretar custos públicos de adaptação da ordem de 42 bilhões de euros. A pesquisa também incorpora a meta de redução de 20% no uso de fertilizantes minerais. Os resultados indicaram que tal política pode provocar queda significativa na produção e elevação correspondente nos preços dentro da União Europeia, sendo que a redução de 50% nos balanços de nitrogênio é o fator que gera os efeitos

mais intensos. O estudo mostrou ainda que o uso de fertilizantes minerais por hectare e de agrotóxicos por hectare teria uma redução expressiva, em torno de 51%.

Utilizando o modelo NEWAGE com bases GTAP e EXIOBASE 3, Kattelman *et al.* (2021) investigaram os encargos associados à adoção das políticas do Green Deal entre as regiões da União Europeia, evidenciando heterogeneidades distributivas. Em linha semelhante, Ciot (2022) emprega o modelo IGEM com dados do Eurostat para analisar os fatores que moldam a implementação do Green Deal nos países da Europa Central, identificando entraves institucionais e oportunidades de aprimoramento. Complementarmente, Schlör e Schubert (2022) utilizaram um modelo multinacional dinâmico com dados artificiais para explorar as inter-relações entre crescimento econômico e o nexos alimento-energia-água, distinguindo as trajetórias potenciais de um país europeu emergente e um país desenvolvido. Já Beňkovskis *et al.* (2023), a partir de um modelo CGE-EUROMOD aplicado à Letônia, avaliaram como a precificação de carbono e políticas associadas podem induzir uma transformação verde no curto prazo com tecnologias disponíveis. Por sua vez, Kuiper e Zeist (2023) recorreram ao modelo MAGNET com matrizes MRIO para estimar impactos diretos e indiretos, até 2034, das mudanças no consumo alimentar decorrentes do Green Deal em países da UE e parceiros externos.

Outros estudos concentram-se em setores estratégicos e nas implicações sistêmicas das medidas climáticas da UE. Nagel *et al.* (2023) empregaram o modelo BALMOREL com informações do GECO e do Centro Comum de Pesquisa para examinar os efeitos das metas climáticas sobre os mercados nórdicos de eletricidade e aquecimento urbano, tanto sob precificação isolada de carbono quanto combinada com políticas de eliminação do carvão, expansão renovável e eletrificação. Em escala global, Clora, Corong e Yu (2024) utilizaram o GTAP-E-CP para simular os efeitos de diferentes regimes de isenção de preços de carbono, avaliando impactos sobre competitividade setorial e eficiência das políticas de emissões da UE. No âmbito da agricultura europeia, Panknin *et al.* (2024) avançaram metodologicamente ao aplicar técnicas de metamodelagem ao CAPRI, a partir de dados primários, para derivar posições políticas ótimas no contexto da Estratégia “*Farm to Fork*”, contribuindo para a identificação de medidas mais eficientes para o cumprimento das metas do Green Deal. Esse conjunto de trabalhos demonstra a diversidade de abordagens modeladas sobre os efeitos econômicos, ambientais e distributivos das políticas climáticas europeias.

Outros trabalhos, que vão além do enfoque da estratégia “*Farm to Fork*” e do Green Deal podem ser destacados, como o de Rendleman, Reinert e Tobey (1995) que utilizaram um

modelo EGC para a economia americana a fim de estimar os efeitos econômicos da redução de fertilizantes agrícolas em setores agrícolas individuais e na economia como um todo. Para tanto, construíram uma MCS como base de dados para o modelo EGC empregado. Suas análises foram formuladas com base em duas desagregações: setor agrícola e não agrícola. Os resultados apontaram que o custo real para a sociedade de restringir o uso de fertilizantes em 20% em todos os usos foi estimado em US\$ 2,3 bilhões. Seriam necessários impostos de 36% e 19% sobre fertilizantes, para alcançar a redução de 20% no uso total deste. À medida que os insumos químicos se tornam mais caros, os usuários passam a adotar cada vez mais substitutos e técnicas alternativas de produção.

Warr e Yusuf (2014) avaliaram a efetividade dos subsídios para fertilizantes em comparação com a proteção do mercado de arroz como estratégias de política voltadas para a redução da pobreza e a garantia da autossuficiência alimentar na Indonésia. O estudo utilizou um modelo de equilíbrio geral computável (CGE) integrado a uma abordagem multifamiliar, analisando três cenários distintos, nos quais foi simulada uma redução de 10% nas importações de arroz em relação ao cenário de referência. A análise considerou diferentes valores para a elasticidade de substituição entre fertilizantes e outros insumos produtivos. No primeiro cenário, que adotou subsídios aos fertilizantes, o nível do subsídio foi definido endogenamente. Os resultados indicaram que essa política se mostrou mais eficaz para o aumento da renda. Diferentemente das restrições às importações, os subsídios também tiveram um impacto positivo na redução da pobreza, impulsionando os salários de trabalhadores não qualificados e reduzindo o preço do arroz para os consumidores, o que ampliou o poder de compra das famílias de menor renda.

Já Boulanger *et al.* (2017) desenvolveram um modelo EGC, com uma MCS 2014 como banco de dados, para abordar os impactos da construção de uma nova fábrica de fertilizantes no setor agrícola e no resto da economia, visto que a segurança alimentar continua sendo um desafio em muitos países da África Subsaariana e no Quênia em particular, especialmente no que tange acesso aos alimentos. Os resultados sugerem que o aumento da produção doméstica de fertilizantes não atinge os objetivos de reduzir a pobreza rural e aumentar a produção agrícola sem políticas que ajudem os pequenos agricultores a superarem a armadilha da tecnologia atrasada e dar-lhes melhor acesso aos mercados de insumos e produtos. Para ajudar os pequenos agricultores, o planejador de política deveria adotar algumas políticas complementares, como aumentar o acesso ao mercado de fertilizantes e agricultura, melhorando a infraestrutura rural ou os serviços de extensão para treinar pequenos agricultores sobre fertilizantes e uso da terra.

Bartelings, Verma e Boysen-Urban (2021) analisaram a gestão de resíduos e a economia circular em um modelo de equilíbrio geral computável (CGE) para a Europa, visando avaliar os impactos econômicos e ambientais de políticas voltadas à redução, reutilização e reciclagem de resíduos. A metodologia emprega um modelo MAGNET que incorpora fluxos de resíduos e interações entre setores produtivos, permitindo simular diferentes cenários de políticas ambientais. No ano base, a maior parte do composto produzido pelo setor de biocompostagem foi utilizada como biofertilizante, com 95% do composto destinado aos setores de cultivo em 2014. No entanto, projeta-se que, até 2050, a demanda por energia aumentará significativamente, elevando o preço da energia e impulsionando a demanda por bioeletricidade. Esse crescimento estimulará uma maior necessidade de biomassa, parte da qual poderá ser fornecida pelo setor de biocompostagem, reduzindo a disponibilidade de composto para os setores de cultivo. Apesar dessa redistribuição, o uso total de composto na agricultura não deve diminuir, pois a maior geração de resíduos verdes ampliará a oferta de biofertilizantes, substituindo fertilizantes fósseis mesmo sem políticas específicas para incentivar essa mudança.

O Quadro 6 apresenta um panorama sintético de estudos que analisam, direta ou indiretamente, políticas, estratégias e cenários relacionados ao uso de insumos agrícolas sob a ótica da metodologia de equilíbrio geral. Trata-se de uma seleção organizada cronologicamente (da literatura mais antiga à mais recente) reunindo contribuições que, embora não tenham sido detalhadas acima, compõem um corpo relevante de evidências sobre como diferentes modelos, bases de dados e recortes espaciais têm sido mobilizados para avaliar impactos econômicos, ambientais e setoriais associados às transformações nas políticas agrícolas e climáticas. Esse conjunto complementa a revisão apresentada ao fornecer um escopo das abordagens existentes, sob um olhar metodológico envolvendo modelos EGC e equilíbrio parcial e debates sobre insumos, agricultura e produtividade.

**Quadro 6 - Literatura sobre políticas, estratégias e cenários relacionados com insumos agrícolas usando EGC**

| <b>Literatura</b>               | <b>Modelo</b>                      | <b>Dados</b>                                                                                                                                   | <b>Contexto Espacial</b> | <b>Objetivos</b>                                                                                                                                                                                                                               |
|---------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Cororaton (1994)                | APEX, PHILCGE<br>entre outros      | MCS, Contas da Renda Nacional; Anuário Estatístico das Filipinas; Pesquisa de Renda e Despesa Familiar; estatísticas comerciais das Filipinas. | Filipinas                | Verificar se os modelos EGC existentes podem ser prontamente adaptados para avaliar e rastrear os micros impactos das políticas de ajustamento estrutural.                                                                                     |
| Storm (1994)                    | CGE para Índia                     | MCS, Pesquisa Anual das Indústrias (1985-1986), estimativas econométricas, entre outros.                                                       | Índia                    | Avaliar o impacto macroeconômico de várias políticas agrícolas durante o período do Sétimo Plano (1985–1990)                                                                                                                                   |
| Frandsen, Hansen e Trier (1996) | GESMEC                             | MCS da Dinamarca                                                                                                                               | Dinamarca                | Calcular os custos de longo prazo de várias medidas de redução de CO <sub>2</sub> e ganhos dos cenários internacionais de liberalização.                                                                                                       |
| Grepperud <i>et al</i> (1999)   | CGE para Tanzânia                  | MCS da Tanzânia                                                                                                                                | Tanzânia                 | Avaliar as duas medidas destinadas a estimular o crescimento econômico e a produção agrícola, sendo elas a liberalização do comércio de milho e um subsídio aos fertilizantes. As interligações economia e meio ambiente são levadas em conta. |
| Wiig <i>et al</i> (2001)        | CGE para Tanzânia                  | MCS da Tanzânia para 1990 e outros estudos                                                                                                     | Tanzânia                 | Simular políticas de ajustamento estrutural, como redução de subsídios aos agroquímicos, redução da taxa de exportação, entre outros.                                                                                                          |
| Frandsen & Jacobsen (2002)      | Modelo EGC nacional para Dinamarca | Matriz Insumo Produto; Contas Agrícolas; e dados agronômicos                                                                                   | Dinamarca                | Analisar os efeitos agrícolas e econômicos de uma eliminação parcial e completa do uso de pesticidas na agricultura.                                                                                                                           |
| Briand (2004)                   | MEGC                               | MCS do Senegal e outros estudos.                                                                                                               | Senegal                  | Determinar a política que torna o serviço de água acessível a todos os agregados familiares e analisar os efeitos na                                                                                                                           |

| Literatura                             | Modelo                                         | Dados                                    | Contexto Espacial | Objetivos                                                                                                                                                                                             |
|----------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                        |                                                |                                          |                   | distribuição de rendimentos para três categorias de consumidores (rurais, Dakar e outras áreas urbanas).                                                                                              |
| Holden, Lofgren & Shiferaw (2005)      | CGE para 3 aldeias nas terras altas da Etiópia | MCS da Etiópia                           | Etiópia           | Verificar o efeito de uma política de aumento de impostos e remoção de subsídios aos fertilizantes, sobre as externalidades ambientais de degradação do solo e da produtividade da terra.             |
| Elshennawy (2011)                      | CGE para o Egito                               | CGE desenvolvido por Lofgren (2002)      | Egito             | Avaliar a magnitude do duplo dividendo da imposição de um imposto sobre a utilização de fertilizantes.                                                                                                |
| Sajadifar, Khiabani e Arakelyan (2012) | Modelo CGE                                     | MCS                                      | Irã               | Investigar os impactos de implementação do Imposto sobre o Valor Acrescentado (IVA) na economia iraniana, com isenção de imposto para fertilizantes e pesticidas.                                     |
| Bellora e Bureau (2014)                | Mirage-BioF                                    | GTAP; European Farm Accounting; Eurostat | Global            | Quantificar os efeitos ambientais e comerciais de uma agricultura europeia mais verde, medindo o deslocamento da produção agrícola, contabilizando importantes efeitos de substituição e de receitas. |
| Mousavi, Farajzadeh, Taheri (2015)     | MCS (1999)                                     | GTAP                                     | Irã               | Investigar os impactos econômicos e ambientais de subsídios aos produtos químicos e aos pesticidas no setor agrícola.                                                                                 |
| Von Arnim <i>et al</i> (2015)          | Modelo CGE estruturalista                      | MCS; GTAP                                | Global            | Desenvolver um modelo estruturalista de EGC para países menos desenvolvidos dependentes de matéria prima e simular choques globais nos preços de Etiópia, Moçambique e Burkina Faso.                  |

| Literatura                       | Modelo           | Dados                                                                                                         | Contexto Espacial | Objetivos                                                                                                                                                                                                                                                |
|----------------------------------|------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Simola (2015)                    | CRESH            | Finanças das empresas Agrícolas e Florestais (Statistics Finland) e estimativas econométricas.                | Finlândia         | Análise das margens intensivas, a partir da aplicação de fertilizantes, em estudos sobre mudanças no uso da terra, a partir da verificação da função de produção.                                                                                        |
| Bollen (2015)                    | WorldScan        | GAINS Data; OCDE (2012)                                                                                       | Global            | Analisar os benefícios da redução das emissões de poluentes atmosféricos, por tipo de gases, como subproduto das políticas climáticas.                                                                                                                   |
| Engida Guthiga & Karugia, (2015) | IFPRI            | MCS da Tanzânia de 2007                                                                                       | Tanzânia          | Verificar os efeitos de choques na PTF em diferentes subsetores agrícolas e principalmente os subsetores pecuários.                                                                                                                                      |
| Bartelings <i>et al</i> (2016)   | GTAP/MAGNET      | GTAP, IFA (Internacional Fertilizer Association), Database for International Trade Analysis                   | Global            | Explicar os três macronutrientes dos fertilizantes: nitrogênio (N), fósforo (P2O5) e potássio (K2O). As simulações averiguaram políticas de apoio aos fertilizantes no contexto de promoção de segurança alimentar e no aspecto de elevação de emissões. |
| Chalise & Naranpanawa (2016)     | CGE para o Nepal | CBS (2011) e GTAP                                                                                             | Nepal             | Investigar a viabilidade de mudanças no uso das terras agrícolas como uma estratégia de adaptação para minimizar os custos das alterações climáticas na agricultura em toda a economia.                                                                  |
| Boulanger <i>et al</i> (2017)    | STAGE_DEV        | MCS (2014); KNBS, 2015a, 2015b); KIHBS (2005/2006); Kenya National Bureau of Statistics (2007); entre outros. | Quênia            | Analisar os impactos da construção de uma nova fábrica de fertilizantes no setor agrícola e no resto da economia.                                                                                                                                        |
| Beckman e Arita (2017)           | GTAP             | GTAP; UNCOMTRADE; MAcMap; AVEs; TARIC; entre outros.                                                          | Global            | Investiga efeitos de barreiras tarifárias ao comercio, desenvolvendo um quadro conceitual que considera diferentes cenários de liberalização parcial.                                                                                                    |

| <b>Literatura</b>                 | <b>Modelo</b>    | <b>Dados</b>                                         | <b>Contexto Espacial</b> | <b>Objetivos</b>                                                                                                                                                                                                                                   |
|-----------------------------------|------------------|------------------------------------------------------|--------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Dissanayake <i>et al</i> (2017)   | GTAP-AEZ         | GTAP                                                 | Global                   | Avaliar o papel da liberalização do comércio e da intensificação agrícola na mitigação das causas e efeitos das alterações climáticas no uso da terra e nas emissões.                                                                              |
| Zhang <i>et al</i> (2003)         | GAMS             | MCS 2012                                             | China                    | Explicar repercussões do aumento nos preços de gás natural sobre os índices de preço ao consumidor e no PIB                                                                                                                                        |
| Beckman <i>et al</i> (2018)       | GTAP-POV         | GTAP; ERA; TRAINS; CEPII-BACI                        | Global                   | Verificar os impactos da tributação na agricultura sobre as exportações, comércio, preços dos alimentos e pobreza no setor agrícola.                                                                                                               |
| Dixon <i>et al</i> (2020)         | EGC para Índia   | MCS                                                  | Índia                    | Verificar os efeitos econômicos da remoção de subsídio agrícola sobre eletricidade, aquisição de fertilizantes e comercialização da produção.                                                                                                      |
| Bareille & Gohin (2020)           | GTAP-Agr         | GTAP                                                 | Global                   | Realizar uma análise dos efeitos da aplicação de pesticidas sintéticos nas atividades agrícolas francesas e no resto do mundo. Foi simulado a implementação de uma política fiscal a fim de verificar os efeitos sobre o meio ambiente e economia. |
| Nadoveza, Ozana e Simurina (2020) | CGE para Croácia | Croatian Bureau of Statistics (CBS 2015); MCS (2010) | Croácia                  | Analisar os potenciais efeitos setoriais de medidas políticas de redução da poluição por nitrogênio.                                                                                                                                               |
| Beckman, Ivanic e Jelliffe (2022) | GTAP-AEZ         | GTAP                                                 | UE                       | Verificar os efeitos de reduções da estratégia “Farm to Fork” sobre a produção agrícola, preços dos alimentos e bem-estar social.                                                                                                                  |

| <b>Literatura</b>             | <b>Modelo</b>                     | <b>Dados</b>                               | <b>Contexto Espacial</b> | <b>Objetivos</b>                                                                                                                                                              |
|-------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Wang (2022)                   | EMRICES-2021                      | MCS                                        | China                    | Implantar um mecanismo de impacto climático-econômico para mudanças de temperatura, precipitação e eventos climáticos extremo utilizando CGE.                                 |
| Boulanger <i>et al</i> (2022) | Modelo CGE para economia queniana | MCS (2014) e Pesquisa Domiciliar do Quênia | Quênia                   | Avaliar os impactos na segurança alimentar da expansão da produção de fertilizantes no Quênia, combinada com um conjunto de mudanças políticas de subsídio aos fertilizantes. |

Fonte: Elaborado pela autora.

A literatura supracitada concentra-se majoritariamente em aplicações de modelos de equilíbrio geral e parcial voltados a países europeus ou a contextos globais, utilizando sobretudo variações do GTAP e modelos estáticos ou comparativos. Esses estudos têm avançado em temas como políticas agrícolas, precificação de carbono, uso da terra, mitigação de gases de efeito estufa e impactos distributivos, mas pouco dialogam com a realidade produtiva brasileira e, especialmente, com a estrutura do setor de bioinsumos.

No caso do Brasil, embora haja um corpo considerável de pesquisas em EGC voltadas ao uso da terra e produtividade agrícola (Faria, 2012; Faria e Haddad, 2019), precificação de carbono (Pereira Jr *et al*, 2024), inovação agrícola (Pacheco e Menezes, 2019), mudanças climáticas e seu efeito sobre agricultura (Ferreira Filho e Horridge, 2010; Miyajima, 2018; Souza, 2018; Tanure, 2024) demanda externa de *commodities* (Sessa et al., 2017), uso da água (Magalhães *et al*, 2019) e segurança alimentar (Johnston *et al*, 2023), ainda não existem estudos específicos que incorporem de forma detalhada análises ligadas aos bioinsumos e produtividade agrícola em um modelo nacional.

A principal contribuição desta Tese reside na adaptação de um modelo de equilíbrio geral dinâmico, que passou a incorporar explicitamente os bioinsumos como setores da atividade econômica, permitindo a identificação de seus efeitos específicos sobre a estrutura produtiva e a dinâmica da economia brasileira. Adicionalmente, o trabalho integra resultados de estimações econométricas ao arcabouço do modelo de EGC, possibilitando a incorporação empírica de elasticidades setoriais aos cenários simulados. Por fim, a tese oferece uma avaliação empírica de um segmento ainda pouco explorado na literatura econômica nacional, cuja expansão apresenta potencial para contribuir simultaneamente para discussões acerca de políticas setoriais alinhadas às temáticas relacionadas ao desenvolvimento sustentável e a estratégias de transição para sistemas agrícolas biológicos e orgânicos menos dependentes de insumos químicos importados.

### **4.3 Dinâmica recursiva**

Por incorporar a dimensão tempo em suas soluções, o modelo BIO-BR permite analisar os efeitos dos instrumentos de política em relação ao cenário prospectivo da economia brasileira (Dixon; Rimmer, 2002). Por isso, esta seção incorpora os mecanismos intertemporais da acumulação do estoque de capital e do mercado de trabalho presentes no modelo. Será apresentada a relação estoque-fluxo entre investimento e capital, a relação positiva entre

investimento e a taxa esperada de retorno, e o ajustamento defasado no mercado de trabalho, basicamente entre o crescimento do salário real e a oferta de emprego nacional. Com tais mecanismos é possível a construção de um cenário de referência, denominado *baseline*, da economia brasileira para o futuro, além de cenários de política, que diferem do *baseline* por tratar choques de valores em alguns instrumentos de política, ou seja, ganhos de produtividade agrícola decorrentes da adoção de bioinsumos, variações nos custos de produção por substituição/complementação de fertilizantes químicos importados por bioinsumos nacionais e subsídios incidentes sobre os bioinsumos sob regimes fiscais diferentes.

O mecanismo de dinâmica recursiva envolve soluções sequenciais, ano a ano, requerendo que o modelo possua dois tipos de equações. O primeiro grupo de equações solucionado como em um modelo de estática comparativa e o segundo que determina a relação intertemporal entre a acumulação do estoque de capital físico e o fluxo de investimento, além do ajuste intertemporal defasado do mercado de trabalho. Em outras palavras, para viabilizar o método de soluções recursivas, o modelo parte da hipótese de expectativas estáticas (ou adaptativas), de modo que a solução de cada ano depende do ano corrente e dos anos anteriores (Dixon; Rimmer, 2002). Portanto, a especificação de dinâmica recursiva se baseia na modelagem do comportamento intertemporal e em resultados de períodos anteriores.

Ainda que não constitua o objeto central desta pesquisa, é relevante observar que abordagens de EGC baseadas em estática comparativa não capturam a evolução temporal dos impactos econômicos provocados por perturbações exógenas. Nesse sentido, a formulação recursiva oferece uma contribuição importante frente às especificações estáticas, uma vez que os mecanismos de transição entre períodos viabilizam o uso do modelo em horizonte temporal explícito, permitindo que os resultados de cada período alimentem e atualizem endogenamente as condições iniciais do período seguinte.

#### 4.3.1 Acumulação de capital e alocação de investimentos

A acumulação de capital no modelo BIO-BR segue a lógica teórica convencional dos modelos de EGC de dinâmica recursiva. Em essência, o estoque de capital de cada setor evolui ao longo do tempo segundo uma regra simples: ao final de cada período, o capital existente sofre uma perda por depreciação e recebe um acréscimo correspondente ao investimento realizado naquele período. A depreciação é tratada como um parâmetro fixo ao longo de toda a

simulação, o que significa que a única fonte de variação na trajetória do capital setorial reside no comportamento do investimento.

O investimento, por sua vez, responde à rentabilidade percebida pelos agentes. A ideia central é que os investidores comparam a taxa de retorno que esperam obter em determinado setor com uma taxa de retorno de referência, considerada normal. Quando a rentabilidade esperada supera esse patamar de referência, o setor atrai um volume de investimento proporcionalmente maior, fazendo com que seu capital cresça acima do ritmo tendencial da economia. Na situação oposta, em que a rentabilidade esperada fica aquém da taxa normal, o investimento se retrai e o capital do setor cresce abaixo da tendência ou até se contrai. Se ambas as taxas coincidem, o capital simplesmente acompanha o crescimento tendencial agregado (Dixon; Rimmer, 2002).

Esse mecanismo incorpora ainda dois elementos relevantes do ponto de vista teórico. O primeiro é a existência de um teto para a taxa de crescimento do capital em cada setor, refletindo restrições práticas à velocidade com que novos investimentos podem ser absorvidos. O segundo é a natureza adaptativa das expectativas de retorno: os investidores formam suas expectativas com base na rentabilidade corrente e passada, sem antecipar choques futuros. Tal formulação implica que as expectativas convergem gradualmente para a taxa de retorno efetiva, por meio de um mecanismo de ajustamento parcial (Dixon; Rimmer, 1998; Betarelli Junior, 2013). Em termos práticos, isso significa que choques de política que elevam a rentabilidade de determinado setor, como a redução de custos proporcionada pela adoção de bioinsumos, geram uma resposta do investimento que se manifesta de forma progressiva ao longo dos períodos de simulação, e não de maneira instantânea.

#### 4.3.2 Ajustamento defasado no mercado de trabalho

O mercado de trabalho incorpora um mecanismo de ajuste dinâmico que conecta três variáveis centrais: o salário real, o nível corrente de emprego e o emprego tendencial de longo prazo. A intuição econômica desse mecanismo é direta: sempre que a economia opera com um nível de ocupação superior àquele previsto pela trajetória tendencial, os salários reais sofrem pressão ascendente proporcional a esse excedente. Como salários mais elevados encarecem o fator trabalho, a demanda por mão de obra nos períodos seguintes tende a se retrair gradualmente, conduzindo o emprego de volta ao seu patamar de longo prazo (Dixon; Rimmer, 2002).

O processo funciona de maneira simétrica na direção oposta. Quando o emprego se encontra abaixo do nível tendencial, o salário real se reduz, tornando a contratação relativamente mais barata e estimulando a absorção de trabalhadores até que o mercado retorne ao equilíbrio. Esse ajustamento não ocorre de forma abrupta, mas sim de maneira progressiva ao longo dos períodos de simulação, caracterizando uma convergência suave em direção ao estado estacionário (Dixon; Rimmer, 2002).

Uma implicação importante dessa formulação é a distinção entre os efeitos de curto e de longo prazo de choques sobre o mercado de trabalho. No curto prazo, um estímulo favorável, como o crescimento da cadeia produtiva de bioinsumos, tende a se manifestar predominantemente na forma de aumento do número de postos de trabalho. À medida que o tempo avança, porém, o ajuste salarial absorve progressivamente o impulso inicial, de modo que no longo prazo o efeito predominante se traduz em elevação do salário real, com o emprego retornando à sua trajetória tendencial (Dixon; Rimmer, 2002). Essa dinâmica confere ao modelo a capacidade de distinguir temporalmente os canais pelos quais políticas de fomento ao setor de bioinsumos afetam o bem-estar dos trabalhadores, seja pela geração de empregos no horizonte mais imediato, seja pela valorização da remuneração real em horizontes mais longos.

#### **4.4 Estrutura teórica do modelo BIO-BR**

Esta seção apresenta a estrutura teórica do modelo BIO-BR. A primeira subseção detalha a especificação central do modelo, com ênfase na estrutura produtiva e em sua vinculação ao modelo ORANI-G. A subseção seguinte descreve as extensões incorporadas ao ORANI-G para introduzir os mecanismos de dinâmica recursiva, em conformidade com a documentação do ORANIG-RD. Por fim, a última subseção expõe a principal inovação do modelo BIO-BR, que consiste na utilização de uma elasticidade do setor de fertilizantes químicos estimada no capítulo 3 dessa Tese, bem como na desagregação dos setores “mãe” incorporando o setor de bioinsumos à análise, a saber: Biofertilizantes; Biodefensivos; e Biocompostagem.

##### **4.4.1 Estrutura de produção**

Na estrutura produtiva, o primeiro nível envolve a fabricação de um ou mais bens pelas indústrias, combinando insumos intermediários ( $X_i$ ) e fatores primários ( $V_i$ ) em proporções

fixas, conforme determinado por uma função Leontief. Já no segundo nível hierárquico, a composição desses insumos segue uma função CES, que possibilita substituição imperfeita entre insumos ou fatores produtivos devido às suas características distintas (Armington, 1969). Essa substituição depende dos preços relativos entre insumos de origem doméstica (D) e importada (M), sendo um aspecto relevante tanto para a produção quanto para o investimento.

Além disso, o valor adicionado na produção resulta da combinação imperfeita entre os fatores produtivos, como trabalho (T), terra (L) e capital físico (K). A estrutura produtiva em dois níveis segue a abordagem descrita por Betarelli Junior *et al.* (2020).

$$Z_i = \left( \frac{X_i}{a_i^X}, \frac{V_i}{a_i^V} \right) \quad (5)$$

Onde,

$$V_i = \left[ \sum_{f=1}^f \delta_{f,i} V_{f,i}^{-\rho^V} \right]^{-\frac{1}{\rho^V}} \forall f = (L, T, K) \text{ e } X_i = \left[ \sum_{s=1}^s \delta_{s,i} X_{s,i}^{-\rho^X} \right]^{-\frac{1}{\rho^X}} \forall s = (D, M). \quad (6)$$

A variável  $Z_i$  representa a produção, enquanto os termos  $a_i^X$  e  $a_i^V$  expressam a eficiência produtiva de cada fator. Os insumos intermediários indicados por  $X_i$ , e  $V_i$  correspondem ao valor adicionado. O parâmetro  $\delta$  obedece à condição  $\sum_{f=1}^f \delta_{f,i} = 1$  ou  $\sum_{s=1}^s \delta_{s,i} = 1$ , enquanto  $\rho$  representa o parâmetro de substituição entre os fatores  $X_i$  e  $V_i$  no setor de agricultura. A formulação teórica é padronizada para todos os setores, variando apenas quanto às elasticidades de substituição e às proporções entre insumos e fatores primários (Betarelli Jr *et al.*, 2020).

No modelo, cada setor da economia tem a capacidade de produzir mais de um produto, empregando para isso uma combinação de insumos domésticos e importados, trabalho, capital, terra e demais custos de produção. A hipótese de multiprodução, embora confira maior realismo à estrutura produtiva representada, introduz complexidade analítica considerável. Para contorná-la, o modelo recorre a uma série de suposições de separabilidade que permitem reduzir substancialmente o número de parâmetros a serem estimados ou calibrados, tornando o problema tratável sem sacrificar as propriedades essenciais da estrutura tecnológica. Uma dessas suposições, o pressuposto da separabilidade fraca na função de produção, implica que as decisões de composição do produto independem da combinação de insumos utilizada, e vice-versa, o que conduz a uma função de produção genérica aplicável a determinados setores da economia (Betarelli Jr. e Domingues, 2014).

$$F(I, O) = 0 \quad (7)$$

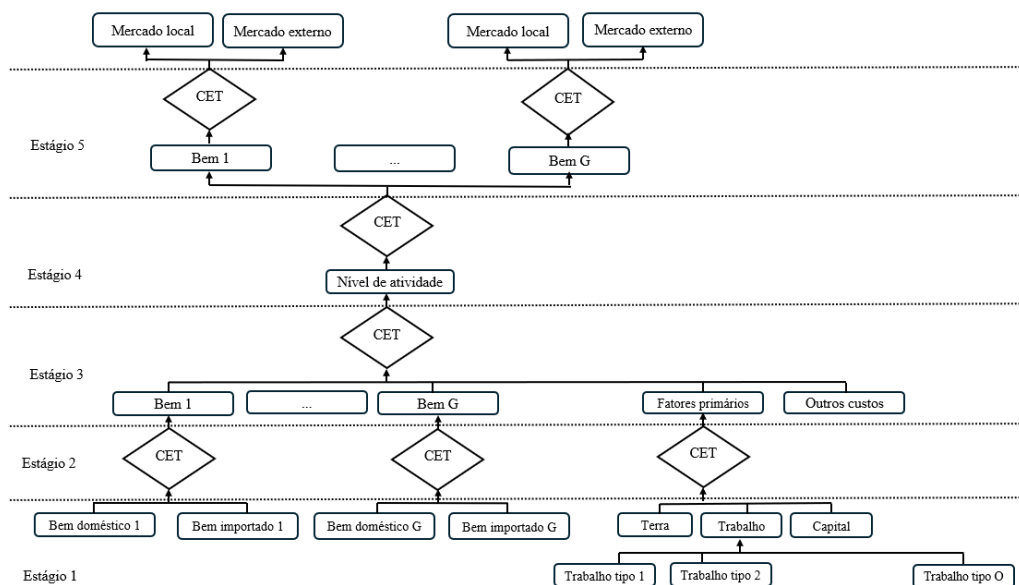
Podemos reescrever como:

$$H(I) = Z = G(O) \quad (8)$$

Na estrutura representada,  $Z$  corresponde ao nível de atividade do setor,  $I$  refere-se ao agregado de insumos empregados na produção e  $O$  designa o conjunto de bens gerados pelo setor. Dessa forma, a função de produção setorial se organiza em dois blocos interdependentes: o primeiro trata da composição do produto setorial, enquanto o segundo diz respeito à combinação dos insumos utilizados, sendo ambos articulados pelo nível de atividade. A função  $G(O)$ , por sua vez, é obtida a partir de dois estágios de agregação baseados em elasticidades de transformação constante (CET, do inglês *Constant Elasticity of Transformation*), que governam, primeiro, a distribuição da produção setorial entre os diferentes bens e, em seguida, a alocação desses bens entre o mercado doméstico e as exportações.

As decisões produtivas podem ser organizadas em cinco níveis, conforme ilustrado na Figura 9. No estágio 1, são definidos os fatores necessários para as atividades produtivas, incluindo os três insumos primários (terra, trabalho e capital), bem como os insumos intermediários. Estes últimos são agregados por meio da abordagem de Armington (1969), que considera a substituição limitada entre bens domésticos e importados.

**Figura 9 - Estrutura de produção**



Fonte: Horridge (2000)

No estágio 2 é adotada a hipótese de combinação em proporções fixas no uso dos insumos intermediários, fatores primários (valor adicionado) e outros custos. A agregação dos insumos para obter volume de produção final do setor em questão é feita pela função Leontief. O estágio 3 e 4, tem-se que as firmas definem a composição ótima de *commodities* que irão produzir de acordo com a função CET definidas pelos setores multiprodução. Já no estágio 5, há a divisão da oferta do bem gerado entre os mercados local e externo a partir da função CET (Corong, 2014; Horridge, 2000).

#### 4.4.2 Demanda por investimentos

A arquitetura produtiva do modelo BIO-BR guarda semelhanças gerais com a lógica apresentada na Figura 10, porém apresenta particularidades importantes. A principal diferença diz respeito ao pressuposto de ausência de importações de bioinsumos, o que implica que o produto ofertado no mercado doméstico não é perfeitamente intercambiável com um bem equivalente estrangeiro, e, portanto, não existe substituição entre produção interna e externa.

Essa estrutura produtiva em dois níveis também se estende à demanda por investimento no modelo. Nessa abordagem, os investidores ( $I_i$ ) combinam insumos de forma a reduzir custos na geração de capital, sem utilizar diretamente fatores primários como insumos produtivos (Betarelli Junior *et al.*, 2021). Além disso, há uma conexão entre investimento e capital baseada no mecanismo dinâmico de acumulação de capital ao longo do tempo, conforme descrito para cada período  $t + 1$  (Horridge, 2011):

$$K_{i,t+1} = (1 - \varphi_i)K_{i,t} + I_{i,t} \quad (9)$$

No modelo,  $K_{i,t}$  representa o estoque de capital disponível para o setor  $i$  no período  $t$ , enquanto  $\varphi_i$  corresponde à taxa de depreciação, assumida como constante ao longo do tempo. O valor inicial do estoque de capital no ano-base é definido exogenamente, e os métodos de calibração são detalhados em Betarelli Junior *et al.* (2020). Conforme descrito por Horridge (2011) e Chen (2019), a distribuição dos investimentos é guiada por duas regras fundamentais:

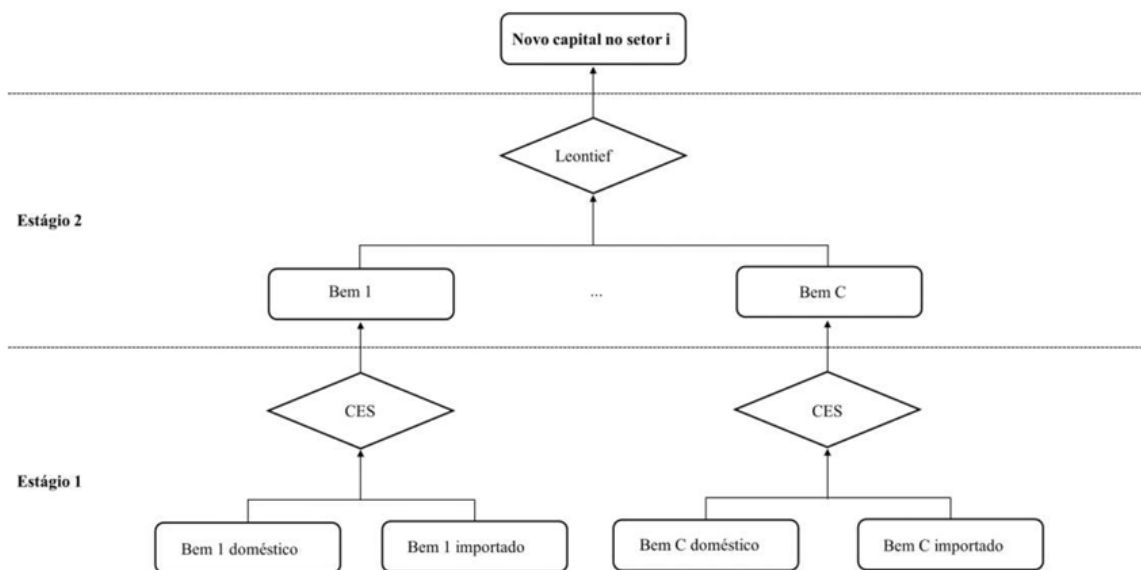
$$G_i = \frac{I_{i,t}}{K_{i,t}} = F(E_i) \quad (10)$$

$$G_i = Q_i \cdot G_i^{Tend} \cdot \frac{(M_i)^{\xi_i}}{Q_i - 1 + (M_i)^{\xi_i}} \quad (11)$$

Na equação (10), a relação entre investimento e capital, assim como a taxa bruta de crescimento do capital no período seguinte, depende positivamente das taxas de retorno esperadas ( $E_i$ ). Na equação (11), essas taxas de retorno esperadas ajustam-se gradualmente às taxas de retorno efetivas por meio de um mecanismo de ajuste parcial (Chen, 2019). Nesse contexto,  $M_i = E_i/R_{j,i}^{Normal}$  representa a taxa normal de retorno do capital para o investidor  $i$ , já  $G_i^{Tend}$  indica a tendência de crescimento dos estoques de capital,  $Q_{i,j}$  corresponde à razão investimento/capital máxima ou de tendência, e  $\xi_i$  expressa a elasticidade do investimento.

A Figura 10 apresenta a demanda por investimentos, dividido em dois estágios. A demanda ótima por bens de capital no estágio 1 é determinada pela imposição de Armington (1969) de substituição imperfeita entre bens importados e domésticos. Já no estágio 2, são criados novos bens de capital do setor  $i$ , a partir da função de produção do tipo Leontief dos compostos de insumos de capital  $c$ .

**Figura 10 - Estrutura da demanda por investimentos**



Fonte: Horridge (2000)

#### 4.4.3 Demanda das famílias

Na estrutura de demanda das famílias, cada família  $h$  busca maximizar sua utilidade, levando em consideração uma restrição orçamentária. A utilidade é determinada por uma

função Klein-Rubin (Klein & Rubin, 1947), que pode ser não-homotética ou quase-homotética, dividindo os gastos em duas partes, como demonstrado na Figura 11. Destaca-se que uma parcela fixa é destinada à subsistência ( $Z_i^{Sub}$ ) e uma parte residual, referente aos "gastos com luxo" ( $Z_i - Z_i^{Sub}$ ), que cresce conforme a renda aumenta (Betarelli Junior *et al.*, 2020; Burfisher, 2021), assim tem-se:

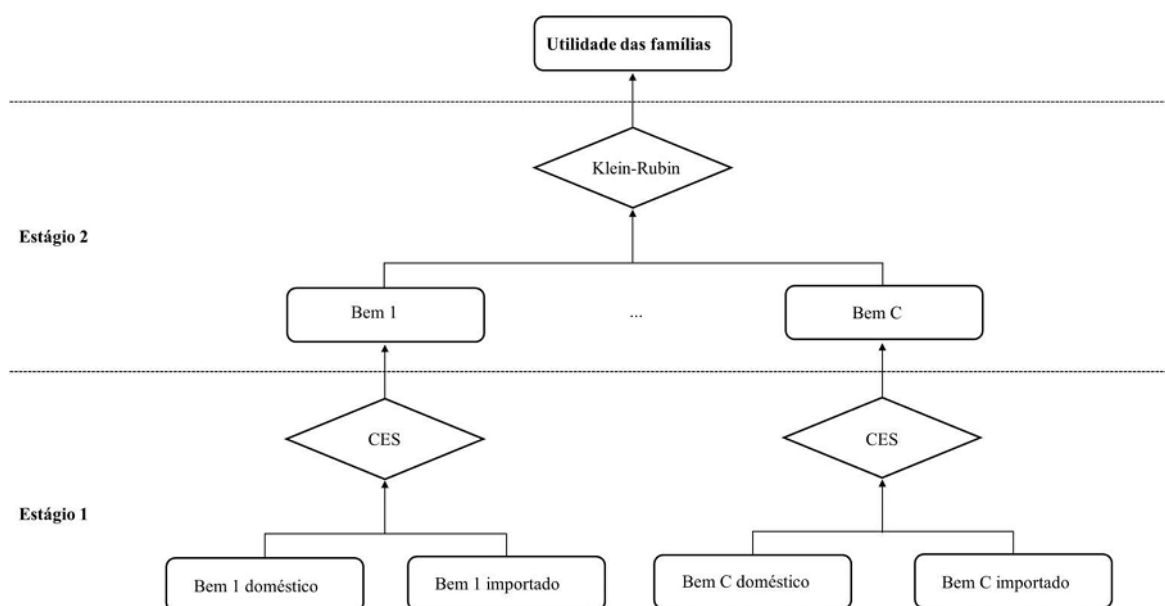
$$U(Z_1, \dots, Z_c) = \sum_{i=1}^c S_i^{Lux} \ln (Z_i - Z_i^{Sub}) \quad (12)$$

O  $Z_i$  representa a demanda total pelo bem  $i$ , enquanto  $S_i^{Lux}$  refere-se à parte do resíduo alocada a cada bem de luxo, em relação ao total gasto com itens de luxo. A demanda por bens de luxo depende da renda das famílias e dos preços relativos dos produtos, que influenciam a escala da função de utilidade do consumidor. Nessa abordagem, apenas as quantidades demandadas dos bens que superam os níveis de subsistência variam na mesma proporção que a renda. A participação orçamentária dos bens de subsistência aumenta quando a renda diminui e diminui quando a renda cresce. Nesse cenário, na cesta de consumo das famílias, é possível identificar alguns bens inferiores, caso ainda sejam considerados de subsistência. As famílias também fazem escolhas racionais entre bens nacionais e importados (função CES) (Betarelli Junior *et al.*, 2020; Burfisher, 2021). Em síntese a Figura 11 traz a estrutura de consumo das famílias dividida em dois estágios. As commodities são agregadas pela função de Klein-Rubin, levando a um sistema linear de gastos (LES – *Linear Expenditure System*) (Horridge, 2000).

Na formulação do setor externo o BIO-BR, assim como no ORANI-G, distingue dois tipos de exportações: as individualizadas e as coletivas. As exportações consideradas estratégicas ou mais sensíveis às condições de preço são tratadas de forma isolada, enquanto aquelas cuja oferta ao exterior é pouco responsiva a oscilações de preços (caso típico de diversos serviços) são representadas de maneira coletiva (Corong, 2014).

É importante salientar que o comportamento das exportações é determinado por curvas de demanda que diminuem quando os custos domésticos de produção aumentam e que se elevam diante de expansões exógenas da renda internacional. Essa formulação está associada à suposição de país pequeno no comércio global, segundo a qual alterações no fluxo comercial brasileiro não exercem impacto significativo sobre os preços praticados no mercado internacional. Nessa perspectiva, os parâmetros mencionados anteriormente são justamente aqueles que possibilitam deslocamentos no preço externo percebido pelo país.

**Figura 11 - Estrutura de consumo das famílias**



Fonte: Horridge (2000)

#### 4.4.4 Demanda do governo

A demanda do governo é tratada como variável endógena. Diferentemente da especificação original (Horridge, 2000), em que o consumo agregado do governo é ajustado conforme a evolução do consumo real das famílias, neste trabalho o gasto do governo acompanha a variação do PIB nas simulações de baseline e de política. Adicionalmente, é possível compensar esse gasto de modo a manter o resultado primário do orçamento exógeno, entre outras formas de tratamento da despesa pública disponíveis no modelo. A demanda por estoques acompanha o comportamento da produção doméstica (Betarelli Junior, 2013; Horridge, 2000), enquanto as necessidades de margens (relacionadas às atividades de comércio e transporte) são determinadas proporcionalmente aos fluxos das commodities às quais estão vinculadas. Essas margens representam o dispêndio necessário para que cada commodity, seja de origem interna ou importada, seja entregue ao usuário final, como produtores, famílias, governo, exportadores e investidores (Corong, 2014; Cardoso, 2020; Proque, 2019). Dessa forma, a demanda total por bens domésticos e importados resulta da soma das demandas de todos esses usuários, juntamente com a demanda por margens.

No que diz respeito aos preços de compra enfrentados pelos principais grupos de usuários (produtores, investidores, famílias, governo e exportadores) estes são compostos pelos preços básicos, pelos impostos sobre vendas e pelas margens. Os preços básicos das *commodities* domésticas correspondem ao valor recebido pelos produtores; já para as importações, representam o valor pago pelos importadores, incluindo tarifas e demais taxas aplicáveis (Corong, 2014). Os impostos sobre vendas são modelados como alíquotas *ad valorem* aplicadas sobre os preços básicos. No modelo linearizado, as variáveis associadas a esses impostos refletem alterações percentuais no chamado "poder da tarifa", que corresponde ao somatório entre a unidade e a alíquota *ad valorem* vigente (Horridge, 2000). Adicionalmente, na implementação do modelo dispomos de um deslocador tributário geral para tributos diretos e indiretos, que perpassa todo o sistema tributário, alcançando tanto os impostos indiretos incidentes sobre as vendas a consumo intermediário, investimento, famílias, exportações e governo, quanto os impostos diretos sobre as corporações e sobre a renda das famílias (Cardoso, 2020).

Esse deslocador, denominado *ftaxgen* no modelo, é uma variável de mudança percentual que interage de forma transversal com a totalidade do sistema tributário, razão pela qual cumpre papel central na avaliação da dinâmica fiscal das simulações. De forma mais específica, em virtude dessa ampla interação com o conjunto da arrecadação, a *ftaxgen* é o instrumento que viabiliza o fechamento de orçamento equilibrado via tributação. Tendo em vista que o número de variáveis do modelo excede o de equações, recorreremos a uma troca (*swap*) no fechamento: a *ftaxgen*, originalmente exógena, passa a flutuar endogenamente, ao passo que a variável derivada da poupança do governo torna-se exógena. Dessa maneira, qualquer alteração na poupança do governo é compensada por uma variação idêntica na tributação direta e indireta geral, de modo a manter constante a razão entre poupança do governo e PIB ao longo da trajetória, condição que caracteriza o ajuste fiscal das simulações. Cabe ressaltar, contudo, que esse mecanismo deve ser empregado com cautela em projeções de longo prazo: uma vez que PIB e poupança do governo tendem a apresentar padrões de crescimento distintos, o ajuste integral via tributação pode, em média, gerar resultados excessivamente contracionistas, ao elevar o preço efetivo dos fatores primários e desestimular a formação de capital (Cardoso, 2020).

No fechamento usual, o deslocador tributário geral é mantido exógeno. No entanto, ao permutá-lo com a variável de ajuste do gasto governamental que mantém constante a poupança pública em relação ao PIB, isto é, ao tornar o deslocador endógeno e exogeneizar o resultado

primário do governo, esse deslocador passa a flutuar de modo a ajustar o conjunto das alíquotas e manter constante a razão entre poupança do governo e PIB ao longo do horizonte de projeção. Dessa maneira, qualquer alteração na poupança do governo decorrente do choque de política é compensada por variação equivalente na tributação direta e indireta, de tal forma que o resultado fiscal seja preservado. Esse mecanismo é o que torna possível simular um cenário de equilíbrio orçamentário, no qual o impacto da política sobre as contas públicas é absorvido por meio do ajuste tributário, e não por meio de variação no déficit (Cardoso, 2020).

Assim como ocorre nos modelos ORANI-G e PHILGEM, o BIO-BR também permite flexibilidade na representação de impostos indiretos. As alíquotas aplicadas sobre as vendas permanecem na forma *ad valorem* sobre os preços básicos, e quaisquer modificações na tributação podem ser introduzidas como mudanças no poder da tarifa para cada usuário específico (Corong, 2014; Horridge, 2000).

O modelo BIO-BR adota ainda a formulação convencional do PIB pela ótica da renda e da despesa, seguindo o padrão do ORANI-G. Pelo lado da renda, o PIB nominal é calculado somando-se os pagamentos destinados aos fatores primários (trabalho, terra e capital) acrescidos de outros custos e da arrecadação total de impostos incidentes sobre as *commodities*. Sob a ótica da despesa, o PIB corresponde à soma do consumo dos diversos usuários, ponderada pelas variações percentuais dos respectivos índices de preço e quantidade. Também é possível expressar o PIB a custo de fatores, isto é, considerando apenas a remuneração dos fatores produtivos, desconsiderando subsídios e tributos (Horridge, 2000; Corong, 2014).

No que se refere às novidades incorporadas à estrutura teórica do modelo, destaca-se a introdução explícita dos setores de bioinsumos, operacionalizada por meio da abertura dos setores-mãe de adubos e fertilizantes, defensivos agrícolas e água, esgoto e gestão de resíduos. Essa estratégia permitiu representar, com a base de dados do ano-2015 da MIP, os produtos de biofertilizantes, biodefensivos e biocompostagem, preservando a estrutura produtiva original da economia e as identidades contábeis do modelo. Nas subseções a seguir essas informações serão mais bem detalhadas.

#### 4.4.5 Demanda por exportação

No tratamento do comércio exterior, o modelo distingue as exportações em duas categorias: exportações individuais e exportações coletivas. As principais *commodities* de exportação são modeladas de forma individualizada, cada uma com sua própria curva de

demanda e elasticidade-preço específica. Já os bens e serviços cujas exportações apresentam baixa sensibilidade a variações de preços, como telecomunicações e transporte aéreo, são agrupados e tratados de forma agregada no bloco de exportações coletivas (Corong, 2014).

Para as exportações individuais, a demanda externa por cada bem depende fundamentalmente de dois fatores: o preço doméstico de produção convertido em moeda internacional e eventuais deslocamentos exógenos na demanda mundial. A relação entre quantidade exportada e preço é inversa, ou seja, quanto maior o custo doméstico de produção expresso em moeda estrangeira, menor a quantidade demandada pelo mercado externo. Essa formulação incorpora a hipótese de país pequeno no comércio internacional, segundo a qual as variações nas exportações brasileiras não exercem influência sobre os preços praticados nos mercados globais. A equação de demanda por exportações individuais contempla ainda parâmetros que permitem simular choques tanto pelo lado dos preços quanto pelo lado das quantidades demandadas, o que viabiliza, por exemplo, a representação de cenários de expansão da renda dos parceiros comerciais ou de alterações na competitividade externa dos produtos brasileiros.

No caso das exportações coletivas, a demanda por cada bem pertencente a esse grupo acompanha o comportamento de um agregado comum de exportações, com a possibilidade de ajustes na composição interna desse agregado por meio de parâmetros de deslocamento específicos. Em termos práticos, isso significa que os bens agrupados nessa categoria se expandem ou se contraem de maneira conjunta, embora sua participação relativa dentro do grupo possa ser alterada exogenamente ao longo das simulações.

#### **4.5 Estrutura dos dados e parâmetros do modelo**

Esta seção apresenta o processo de calibração do modelo, etapa responsável por atribuir valores aos parâmetros e coeficientes que compõem o cenário inicial ou estado de referência. Para isso, utilizou-se como principal fonte uma Matriz de Contabilidade Social (MCS) construída especificamente para o Brasil, integrando informações da Matriz de Insumo-Produto (MIP) de 2015 (IBGE, 2015) e do Sistema de Contas Nacionais mais recente (IBGE, 2023) (Proque, 2019). A MIP oferece a estrutura básica dos fluxos econômicos, contemplando consumo intermediário, demandas finais, como investimento, consumo privado e público, exportações, estoques, margens e tributos indiretos (Betarelli Junior, 2013). Já a MCS adiciona a dimensão distributiva, permitindo observar como a renda é gerada e transferida entre os

diferentes agentes da economia, algo que a MIP isoladamente não captura (Proque, 2019). A combinação dessas duas bases fornece uma representação coerente do fluxo circular de produção e renda, essencial para o funcionamento do modelo.

O modelo BIO-BR é estruturado a partir de uma matriz produto  $\times$  produto. A MIP original reconhece 127 produtos e 67 setores e, após a abertura do segmento de bioinsumos, a base passa a contemplar 129 produtos e 67 setores. Uma vez que a semidiagonalização da base de dados não foi possível, dado que um dos bioinsumos é produzido por mais de um setor, optou-se pela diagonalização total da matriz: os 129 produtos foram transformados em setores, de modo que a base passou a contar com 129 setores. Para preservar a coerência analítica da Tese e reduzir o custo computacional, esses 129 setores foram agregados em 54 setores com base na demanda de bioinsumo. Os setores e produtos são apresentados com maior detalhamento nos Quadro 7, sendo que os procedimentos de desagregação dos produtos são discutidos na sequência do trabalho. Após esses ajustes, o sistema contábil reconhece cinco componentes da demanda final (famílias, governo, investimento, exportações e estoques), além de três fatores produtivos (terra, trabalho e capital) e duas origens de oferta, doméstica e externa. São também identificadas importações por produto, um agregado de impostos sobre produção e uma decomposição das principais categorias tributárias nacionais (ICMS, IPI e outros).

**Quadro 7 - Setores econômicos do modelo BIO-BR**

| Nº | Sigla     | Descrição                                                  |
|----|-----------|------------------------------------------------------------|
| 1  | Agric     | Agricultura (lavouras permanentes e temporárias)           |
| 2  | Pecua     | Pecuária                                                   |
| 3  | FlorAq    | Produção florestal, pesca e aquicultura                    |
| 4  | OutExtr   | Extração de minerais não metálicos (exceto petróleo e gás) |
| 5  | PetroG    | Extração de petróleo e gás natural                         |
| 6  | AbCarne   | Abate e produtos de carne                                  |
| 7  | LeiteDer  | Laticínios e derivados do leite                            |
| 8  | Acucar    | Fabricação de açúcar                                       |
| 9  | OtAlim    | Outros produtos alimentícios                               |
| 10 | OleoVeA   | Óleos vegetais e gorduras                                  |
| 11 | Bebida    | Fabricação de bebidas                                      |
| 12 | Fumo      | Produtos do fumo                                           |
| 13 | TextilCal | Têxteis, vestuário e calçados                              |
| 14 | PMadei    | Produtos de madeira                                        |
| 15 | CeluPap   | Celulose, papel e produtos de papel                        |

| <b>Nº</b> | <b>Sigla</b> | <b>Descrição</b>                                |
|-----------|--------------|-------------------------------------------------|
| 16        | RfPetro      | Refino de petróleo                              |
| 17        | EtanolB      | Produção de biocombustíveis (etanol, biodiesel) |
| 18        | QuimIno      | Química inorgânica                              |
| 19        | AduboFe      | Fertilizantes (adubos químicos)                 |
| 20        | BioFer       | Biofertilizantes                                |
| 21        | QuimOrg      | Química orgânica                                |
| 22        | ResinaF      | Resinas e elastômeros                           |
| 23        | DefAgri      | Defensivos agrícolas (agrotóxicos)              |
| 24        | BioDef       | Biodefensivos                                   |
| 25        | QuimDiv      | Outros produtos químicos                        |
| 26        | TintasV      | Tintas, vernizes e similares                    |
| 27        | PerfuFar     | Perfumaria, cosméticos e farmacêuticos          |
| 28        | PMnMeta      | Produtos de minerais não metálicos              |
| 29        | FerroAco     | Produção de ferro e aço                         |
| 30        | MetNFerr     | Metalurgia de metais não ferrosos               |
| 31        | PMetal       | Produtos de metal                               |
| 32        | Eletron      | Equipamentos eletrônicos                        |
| 33        | EscInf       | Equipamentos de informática                     |
| 34        | EqMedOp      | Equipamentos médico-hospitalares                |
| 35        | MqEletr      | Máquinas e equipamentos elétricos               |
| 36        | ManMqEq      | Máquinas e equipamentos (outros)                |
| 37        | AutoUt       | Automóveis e utilitários                        |
| 38        | PecVeic      | Pecas e acessórios para veículos                |
| 39        | OtEqTra      | Outros equipamentos de transporte               |
| 40        | IndDiv       | Indústrias diversas                             |
| 41        | EletGasUt    | Eletricidade, gás e utilidades                  |
| 42        | AguaEsgR     | Água, esgoto e gestão de resíduos               |
| 43        | BioComt      | Biobiocompostagem                               |
| 44        | Constr       | Construção civil                                |
| 45        | Comerc       | Comércio (atacado e varejo)                     |
| 46        | TCarga       | Transporte de carga                             |
| 47        | TTPass       | Transporte terrestre de passageiros             |
| 48        | TAereo       | Transporte aéreo                                |
| 49        | ArmaCorr     | Armazenagem, correio e logística                |
| 50        | ServInf      | Serviços de informação e comunicação            |
| 51        | Financ       | Serviços financeiros                            |
| 52        | TecAdm       | Serviços técnicos e administrativos             |
| 53        | AdmPubl      | Administração pública                           |

| Nº | Sigla   | Descrição       |
|----|---------|-----------------|
| 54 | ServDiv | Outros serviços |

Fonte: Elaboração própria

Adicionalmente, a estrutura do BIO-BR contempla um agregado que representa o setor doméstico, composto por 10 tipos de famílias organizadas de acordo com a renda (Proque, 2019). A estrutura dos grupos, quanto à quantidade de indivíduos, seguiu a divisão por classes de rendimento monetário. A Pesquisa de Orçamentos Familiares (POF) de 2018 abrangeu 74.966 domicílios. Em janeiro de 2018, mês de referência adotado, o salário-mínimo vigente tinha o valor de R\$ 954,00 (IBGE, 2018b). Assim, as famílias se dividem nas seguintes classes, conforme representadas na Tabela 3. O número de famílias e de indivíduos em cada classe de renda, conforme a POF 2018, também são ilustrados a seguir na Tabela 3.

**Tabela 3 - Tipos de famílias segundo as classes de renda familiar**

| Famílias mínimos | Salários    | Intervalo de renda familiar (R\$) | Número de famílias | Número de Pessoas |
|------------------|-------------|-----------------------------------|--------------------|-------------------|
| H <sub>1</sub>   | 0 a 2       | R\$ 1.908                         | 16.657.899         | 45.436.207        |
| H <sub>2</sub>   | 2 a 3       | R\$ 1.908 e R\$ 2.862             | 13.079.821         | 37.110.612        |
| H <sub>3</sub>   | 3 a 5       | R\$ 2.862 e R\$ 4.770             | 13.066.823         | 50.657.347        |
| H <sub>4</sub>   | 5 a 6       | R\$ 4.770 e R\$ 5.724             | 16.165.840         | 16.096.891        |
| H <sub>5</sub>   | 6 a 8       | R\$ 5.724 e R\$ 7.632             | 4.893.071          | 20.376.344        |
| H <sub>6</sub>   | 8 a 10      | R\$ 7.632 e R\$ 9.540             | 6.168.979          | 10.712.082        |
| H <sub>7</sub>   | 10 a 15     | R\$ 9.540 e R\$ 14.310            | 3.323.368          | 13.432.607        |
| H <sub>8</sub>   | 15 a 20     | R\$ 4.310 e R\$ 19.080            | 4.252.496          | 5.483.711         |
| H <sub>9</sub>   | 20 a 30     | R\$19.080 e R\$28.620             | 1.785.546          | 4.253.261         |
| H <sub>10</sub>  | Acima de 30 | Mais de R\$ 28.620                | 1.394.504          | 3.544.728         |

Fonte: Elaboração própria com base nos dados da POF (2018).

Desse modo, a incorporação do número de famílias na estrutura de dez grupos por faixa de renda é fundamental para a análise proposta nesta tese, pois permite avaliar de forma mais precisa os efeitos distributivos associados aos subsídios ofertados para elevar a difusão dos bioinsumos. De acordo com a POF-2018, 22% das despesas das famílias brasileiras são destinadas à alimentação, especialmente nos estratos de menor renda (IBGE, 2019). Nesse contexto, tanto mudanças na produtividade agrícola quanto políticas específicas aplicadas ao

setor de bioinsumos afetam não apenas os preços e a oferta de alimentos, mas também o padrão de consumo das famílias. Assim, ao relacionar a dinâmica produtiva do setor agrícola com a estrutura de consumo das famílias, a abertura das dez categorias familiares amplia a capacidade analítica do modelo de capturar impactos econômicos e distributivos relevantes. Os detalhes completos do procedimento de identificação das 10 famílias podem ser encontrados em Proque (2019), onde são descritos os critérios, as fontes de dados e as etapas metodológicas adotadas.

Além dos dados fornecidos pela MCS, a etapa de calibração de um modelo de equilíbrio geral requer a definição de um conjunto de parâmetros comportamentais, isto é, elasticidades e coeficientes que orientam as respostas dos agentes econômicos (Cardoso, 2020). Esses valores são usualmente obtidos em estudos prévios. As elasticidades associadas à demanda por exportações de bens tradicionais foram adotadas a partir das estimativas apresentadas por Domingues (2002). As elasticidades de substituição entre ocupações e entre fatores primários seguem o procedimento de calibração proposto por Betarelli Júnior (2013). Para o parâmetro de Frisch, que determina a sensibilidade da utilidade marginal do consumo das famílias, utilizou-se a estimativa produzida por Almeida (2011), também adotada em análises posteriores como Magalhães (2013) e Proque (2019). No caso das elasticidades do tipo Armington, este trabalho recorre aos valores calculados por Tourinho, Kume e Pedroso (2007), amplamente empregados em aplicações brasileiras de EGC (Magalhães, 2013; Cardoso, 2020; Proque, 2019; Betarelli, Domingues e Hewings, 2020). O Quadro 8 apresenta de forma resumida todos os parâmetros incorporados ao modelo.

O modelo BIO-BR enquadra-se na família de modelos de EGC com dinâmica recursiva. A calibração desses modelos exige informações detalhadas sobre o estoque de capital e sobre o nível de emprego na economia brasileira, uma vez que ambos são tratados como variáveis exógenas (Betarelli Junior, 2013; Proque, 2019; Betarelli Junior *et al.*, 2022; Betarelli Junior, 2022, 2023). Nesta Tese, seguindo abordagem semelhante à de Cardoso (2020), o mecanismo de ajuste intertemporal do mercado de trabalho foi configurado para que, no estado estacionário, o emprego observado coincida com o emprego de tendência. Com isso, a taxa de crescimento do salário real acompanha a expansão da economia, e a razão entre o emprego efetivo e o tendencial é igual a 1 no período inicial. A elasticidade do salário em relação ao nível de emprego foi definida em 0,66, valor estimado por Gonzaga e Corseuil (2001) e amplamente adotado nos estudos de EGC (Cardoso, 2020; Proque, 2019; Betarelli, Domingues e Hewings, 2020).

**Quadro 8 - Parâmetros do modelo BIO-BR**

| <b>Parâmetro</b>                                                 | <b>Dimensão</b> | <b>Valor</b> |
|------------------------------------------------------------------|-----------------|--------------|
| Elasticidade de Armington de substituição: uso intermediário     | Produto         | 0,15 a 3,59  |
| Elasticidade de Armington para investimentos                     | Produto         | 0,15 a 3,59  |
| Elasticidade de Armington das famílias                           | Produto         | 0,15 a 3,59  |
| Elasticidade da demanda por exportações de bens tradicionais     | Produto         | 0,38 a 2,07  |
| Elasticidade da demanda por exportações de bens não tradicionais | Nacional        | 1,28         |
| Elasticidade de substituição CES para fatores primários          | Setorial        | 0,27 a 1,54  |
| Elasticidade de substituição por ocupações                       | Setorial        | 0,2          |
| Elasticidade de transformação CET                                | Setorial        | 0,5          |
| Parâmetro de Frisch                                              | Famílias        | -1,94        |

Fonte: Elaboração própria, com base na literatura

No que se refere à dinâmica do capital e à formação bruta de investimento, atribuiu-se uma elasticidade do investimento igual a 4,8 para todos os setores, conforme os parâmetros utilizados por Haddad (2004) e Perobelli (2004). A proporção de investimento em relação ao estoque de capital físico varia de 6% a 13% entre os setores, adotando uma taxa de crescimento no estado estacionário de 2,4% (correspondente à média anual de crescimento do estoque de capital entre 2000 e 2016) e aplicando o método do inventário perpétuo (Betarelli Junior *et al.*, 2020), a taxa de depreciação do capital físico resultante varia entre 3% a 11%, valor compatível com os empregados por Betarelli Júnior (2013), de 5%; por Cardoso (2020), de 4%; e por Proque (2019), de 6%. A taxa bruta de retorno do capital que, no ano-base, se iguala à taxa esperada de retorno oscilou até 14% entre os setores, e a razão máximo/tendência do investimento em relação ao estoque de capital foi definida como três vezes o valor tendencial (Betarelli Junior *et al.*, 2020). Todos esses parâmetros podem ser consultados no Quadro 9.

**Quadro 8 - Parâmetros para o módulo de dinâmica recursiva do modelo BIO-BR**

| <b>Parâmetro</b>                              | <b>Dimensão</b> | <b>Valor</b> |
|-----------------------------------------------|-----------------|--------------|
| Taxa de depreciação do capital                | Setorial        | 0,03 a 0,11  |
| Taxa de retorno bruta nominal                 | Setorial        | 0,14         |
| Taxa de retorno bruta esperada                | Setorial        | 0,14         |
| Razão investimento/capital                    | Setorial        | 3            |
| Razão investimento/capital (tendência)        | Setorial        | 0,06 a 0,13  |
| Elasticidade do investimento                  | Setorial        | 4,8          |
| Elasticidade do salário em relação ao emprego | Nacional        | 0,66         |

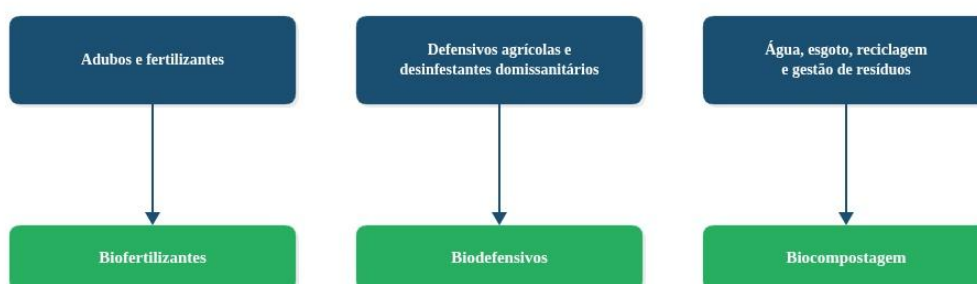
Fonte: Elaboração própria, com base na literatura

#### 4.6 Abertura dos setores e inserção dos bioinsumos na MIP

A Matriz de Insumo-Produto (MIP) de 2015 publicada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística apresenta a estrutura produtiva nacional organizada em 67 setores e 127 produtos, entre os quais se destacam os produtos “adubos e fertilizantes”, “defensivos agrícolas e desinfetantes domissanitários” e “água, esgoto, reciclagem e gestão de resíduos”. Esses produtos, tal como definidos na MIP original, agregam bens de natureza química, sintética, biológica e até mesmo orgânica, não permitindo que o modelo identifique separadamente os bioinsumos.

Com o objetivo de permitir que o modelo reconheça explicitamente esse segmento, procedeu-se à abertura de produtos específicos da MIP, mantendo inalterada a estrutura setorial. A desagregação resultou na criação de três novos produtos, como apresentado na Figura 12, elevando a base de dados para 129 produtos e 67 setores.

**Figura 12 - Desagregação dos três produtos principais da MIP**



Fonte: Elaborado pela autora.

Entretanto, dado que um dos bioinsumos abertos é produzido por mais de um setor, a semidiagonalização da base de dados não foi tecnicamente viável. Optou-se, portanto, pela diagonalização total da matriz: os 129 produtos foram convertidos em setores, de modo que a base passou a estruturar-se como uma matriz com 129 setores. Essa operação transforma cada produto em seu próprio setor de referência, tornando a matriz diagonal e permitindo a identificação explícita dos bioinsumos como setores produtivos autônomos no modelo.

Com vistas a preservar a coerência analítica da Tese e reduzir o custo computacional associado ao processamento de uma matriz de grande dimensão, os 129 setores resultantes foram agregados em 54 setores, com base na demanda de bioinsumo. Essa agregação não compromete a capacidade do modelo de identificar os bioinsumos como segmento produtivo distinto, uma vez que esses produtos, após a diagonalização, passam a figurar como setores explícitos na estrutura do modelo BIO-BR.

A abertura foi realizada de forma consistente nas linhas da matriz (oferta dos produtos), nas colunas (uso intermediário e demanda final) e nos componentes do valor adicionado e dos impostos, preservando exatamente os totais originais da MIP 2015. Nas linhas, a identificação da parcela correspondente a cada novo produto de bioinsumo foi baseada em dados de 2015 do IBAMA (2025), ANDA (2025) e de entidades setoriais como a CropLife Brasil (2025), a S&P Global (2025) e o Sindiveg (2025). Essas informações permitiram estimar a participação dos bioinsumos no valor da produção total dos produtos “mãe” e podem ser consultadas no Apêndice E, Apêndice F e Apêndice G.

Nas colunas da matriz, a desagregação do consumo intermediário foi realizada aplicando-se essas mesmas participações, assumindo proporcionalidade nos coeficientes técnicos em relação aos produtos de origem, dada a ausência de matrizes tecnológicas específicas para bioinsumos. Os componentes da demanda final (consumo das famílias, consumo do governo, formação bruta de capital e exportações) foram desagregados de forma proporcional, utilizando informações setoriais específicas da CropLife Brasil (2025) e S&P Global (2025), quando disponíveis (consultar Apêndice H), e, nos demais casos, mantendo a estrutura do produto original.

Os impostos indiretos e os componentes do valor adicionado associados aos produtos originais também foram repartidos entre os novos produtos de bioinsumos segundo as participações estimadas na produção, assegurando a coerência contábil da matriz resultante.

Cabe destacar que, embora o ano-base do modelo seja 2015, os dados específicos utilizados para identificar os bioinsumos referem-se ao ano de 2021, em função da inexistência de séries históricas consolidadas para períodos anteriores, conforme confirmado em contato direto com a CropLife Brasil<sup>4</sup>. Dessa forma, a abertura de produtos permite incorporar ao modelo a dinâmica recente do mercado de bioinsumos, sem alterar a estrutura original da MIP, tornando possível a análise econômica desse segmento de forma explícita.

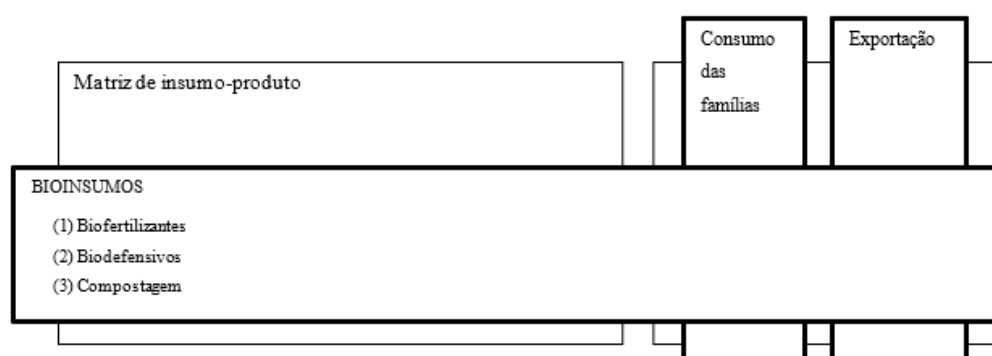
---

<sup>4</sup> Amália Borsari, diretora de bioinsumos da empresa.

Salienta-se que a proposta de abertura do setor de bioinsumos contribui para uma caracterização mais precisa e atualizada da economia brasileira, permitindo que os modelos econômicos, como os de EGC, representem com mais fidelidade a expansão das atividades associadas à bioeconomia, como o caso dos bioinsumos. Com isso, tornam-se viáveis análises mais robustas sobre políticas setoriais e distributivas.

A Figura 13 ilustra a decomposição os produtos que dão nome aos bioinsumos considerados nesta Tese, representados na matriz pelas linhas, com destaque para o consumo intermediário, o consumo das famílias e as exportações, pela ótica das colunas. Esse procedimento permitiu incorporar, de forma mais acurada, o dinamismo recente do setor de bioinsumos à estrutura produtiva da matriz, após o processo de diagonalização.

**Figura 13 - Decomposição dos produtos ligados a bioinsumos**



Fonte: Elaborado pela autora.

Os setores da agricultura e pecuária figuram como os principais demandantes dos produtos relacionados aos bioinsumos, sobretudo os biofertilizantes e biodefensivos. Já os compostos derivados da biocompostagem de resíduos orgânicos domiciliares aparecem vinculados tanto ao setor agrícola quanto às atividades de serviços ambientais.

Para fins desta pesquisa, e apesar da ausência de registros relevantes de exportação, foi necessário verificar a existência de possíveis receitas externas associadas aos produtos desagregados. As informações confirmaram que, até 2015, as categorias de bioinsumos não apresentava dados de exportações em volume mensurável. Essa informação foi corroborada pela diretoria de bioinsumos da CropLife Brasil, que destacou que o setor, naquele momento, ainda se concentrava no atendimento à demanda interna, com cadeias produtivas e logísticas voltadas majoritariamente ao mercado interno.

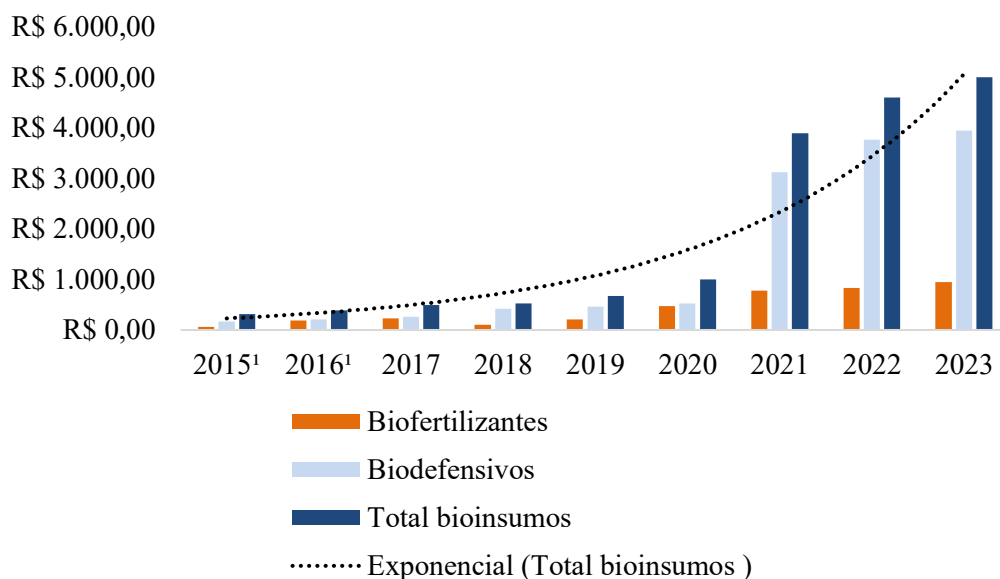
Adicionalmente, os produtos resultantes da biocompostagem (como os esterco orgânicos, biofertilizantes gerados a partir da decomposição de resíduos sólidos urbanos e os compostos húmicos utilizados na agricultura) não são objeto de exportação devido ao seu alto grau de perecibilidade e instabilidade biológica durante o transporte de longa distância. De acordo com a Embrapa (2021), tais materiais demandam condições específicas de armazenamento e aplicação imediata para manter sua eficiência agrônômica, o que inviabiliza sua comercialização em mercados externos.

Para viabilizar a abertura do setor de bioinsumos, foi necessário calcular a estrutura de vendas e de custos associada a biofertilizantes, biodefensivos e biocompostagem, com base em sua participação relativa no total dos setores originais da matriz, como detalhado na subseção a seguir.

#### 4.6.1 Custo de Bioinsumos

A estimativa da oferta de bioinsumos na economia brasileira foi construída com base em dados para o ano de 2015 da MIP, tomando como ponto de partida a participação dos setores de insumos químicos (adubos e fertilizantes, defensivos e domissanitários e água, esgoto e resíduos sólidos) estimados com base em relatórios e levantamentos do setor de bioinsumos da CropLife Brasil (2024). As informações de arrecadação do setor de insumos químicos, disponibilizados em relatórios do Sindiveg (2025) e do ANDA (2025), bem como dados sobre o volume total de bioinsumos no país entre 2015 e 2023, serviram de referência para a análise.

Para os anos de 2015 e 2016, em função da ausência de dados consolidados, foram realizadas estimativas com base na tendência observada em 2017 (como evidenciado na Figura 14). Este ano contou com informações sobre a participação dos biofertilizantes no mercado nacional, conforme relatório da CropLife Brasil (2025). A partir da participação percentual informada, foi possível calcular os volumes de biofertilizantes e biodefensivos, compondo o total de bioinsumos comercializados em 2017. Os dados referentes a 2018 e 2019 também foram extraídos de levantamentos da CropLife, enquanto o ano de 2020 teve como principal fonte o relatório da EHS Market Intelligence. Já para os anos de 2021, 2022 e 2023, as estimativas se basearam novamente em informações atualizadas da CropLife, fornecidas diretamente à pesquisa.

**Figura 14 - Mercado nacional de bioinsumos em termos nominais (Mi de R\$), 2015-2023**

*Nota:* <sup>1</sup> estimativas com base no padrão observado no ano de 2017.

Fonte: CropLife Brasil, 2025; S&P Global, 2021

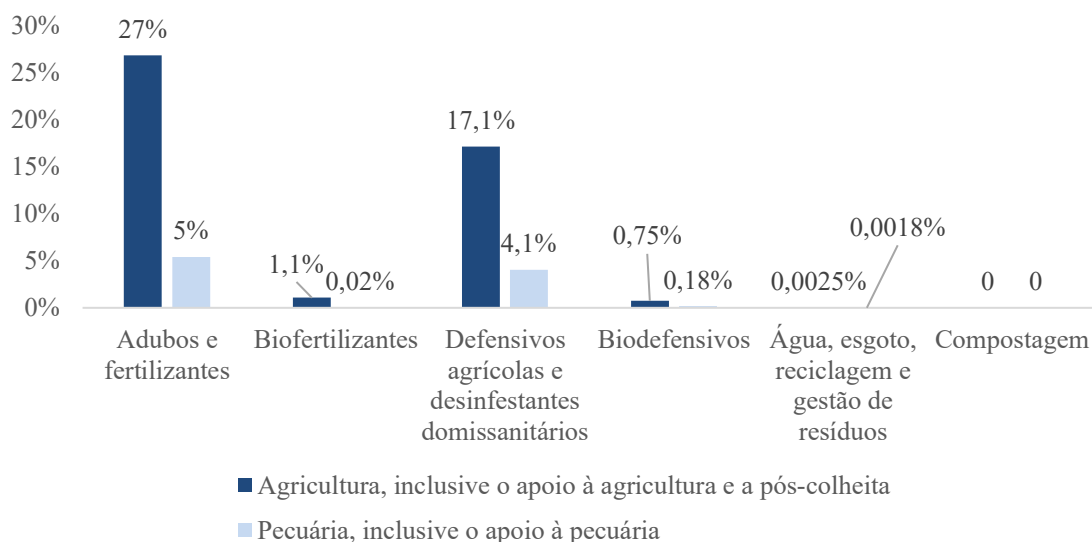
A partir desse levantamento, foi calculada a participação dos setores de bioinsumos na estrutura produtiva, em especial nos subsetores de adubos e fertilizantes e de defensivos agrícolas e domissanitários, com base na distribuição da massa salarial obtidos a partir dos microdados da RAIS/MTE (2021), os quais foram utilizados como critério de ponderação para a identificação da participação relativa desses segmentos. A ponderação aplicada para o setor de biocompostagem, o qual compreende adubos orgânicos oriundos do tratamento da água e de resíduos sólidos, esgoto e efluentes, considerou uma participação de 2% (valor adotado com base nos estudos de Bartelings, Verma e Boysen-Urban, 2021).

#### 4.6.2 Demanda de Bioinsumos

Com base na demanda a preço básico (2015) com dados da MIP e nas estimações da participação dos bioinsumos nos setores econômicos, observa-se que eles ainda desempenhavam um papel bastante modesto na matriz produtiva brasileira em comparação com os insumos químicos tradicionais (Figura 15). Enquanto adubos e fertilizantes químicos somaram 36.310 unidades consumidas e defensivos agrícolas convencionais alcançaram 27.004 unidades, os biofertilizantes totalizaram apenas 1.250, os biodefensivos 1.181 e a

biocompostagem 786. Esses números evidenciam a baixa participação relativa dos bioinsumos na estrutura de demanda da economia nacional à época.

**Figura 15 - Demanda setorial dos insumos químicos e bioinsumos**



Fonte: Elaboração própria com base dos dados da MIP 2015 (IBGE)

A maior parte da demanda por bioinsumos concentra-se no setor primário, notadamente na agricultura e pecuária. A agricultura respondeu por 1.235 unidades do consumo total de biofertilizantes, 866 de biodefensivos e não registrou consumo de biocompostagem. A pecuária aparece com números significativamente menores, com apenas 11 unidades de biofertilizantes e 98 de biodefensivos. Esses dados indicam que, embora incipiente, a adoção de bioinsumos já estava em curso nos principais segmentos do setor agropecuário, especialmente em práticas agrícolas com maior potencial de substituição/complementação de insumos químicos.

Embora o volume total de biodefensivos seja baixo, sua presença em setores industriais e técnicos chama atenção. O setor de fabricação de defensivos e produtos químicos diversos absorveu 149 unidades, e o de produtos farmoquímicos e farmacêuticos, 26. Também há registros no segmento de outras atividades profissionais, científicas e técnicas, com 34 unidades, sugerindo um vínculo entre os biodefensivos e cadeias produtivas de maior densidade tecnológica, pesquisa e desenvolvimento. Essa presença sinaliza um potencial de expansão relacionado à biotecnologia e à inovação em insumos agrícolas.

A biocompostagem, por sua vez, apresenta um padrão distinto de dispersão. Apesar do menor volume absoluto, é utilizada em uma diversidade de setores, incluindo saneamento

ambiental, educação, saúde, administração pública, atividades científicas e associativas. Tal distribuição sugere que a biocompostagem ocupa nichos ligados à gestão de resíduos, políticas públicas e sustentabilidade urbana, refletindo seu caráter transversal e ambientalmente orientado.

#### 4.6.3 Relações de insumo-produto dos setores de insumos agrícolas no Brasil em 2015

Como complemento a essa caracterização estrutural, a Tabela 4 apresenta a participação relativa de fertilizantes, biofertilizantes, defensivos, biodefensivos, água/ esgoto/gestão de resíduos e biocompostagem, nos principais agregados da economia. Os percentuais são calculados a partir da MIP 2015, considerando a produção, o consumo intermediário e os diferentes componentes da demanda.

Os dados indicam que, em 2015, os insumos analisados correspondem a cerca de 1,3% do valor total da produção. No caso do consumo intermediário, essa participação atinge aproximadamente 2,1%, refletindo a utilização desses bens e serviços como insumos nos processos produtivos. Observa-se maior participação de fertilizantes e defensivos no consumo intermediário, enquanto biofertilizantes e biodefensivos apresentam participação reduzida no período considerado.

A decomposição por componentes do comércio exterior mostrou que os defensivos concentraram parcela relevante das importações, com participação de 1,85%, ao passo que os bioinsumos apresentaram participação residual. No que se refere à demanda final, os serviços de água, esgoto e gestão de resíduos apresentam maior peso no consumo das famílias, enquanto fertilizantes e defensivos permanecem predominantemente associados ao consumo intermediário.

**Tabela 4 - Participação (%) dos produtos, 2015**

| Tipo                          | Fertilizantes | Biofertilizantes | Defensivos | Biodefensivos | Água/<br>Esgoto/<br>Resíduos | Biocompostagem | Total |
|-------------------------------|---------------|------------------|------------|---------------|------------------------------|----------------|-------|
| Produção                      | 0,36%         | 0,02%            | 0,28%      | 0,01%         | 0,62%                        | 0,01%          | 1,3%  |
| Consumo Intermediário         | 0,72%         | 0,02%            | 0,53%      | 0,02%         | 0,76%                        | 0,02%          | 2,1%  |
| Exportação de bens e serviços | 0,11%         | 0,00%            | 0,13%      | 0,00%         | 0,00%                        | 0,00%          | 0,2%  |
| Importação                    | 0,35%         | 0,02%            | 1,85%      | 0,05%         | 0,00%                        | 0,00%          | 2,3%  |
| Consumo das Famílias          | 0,00%         | 0,00%            | 0,01%      | 0,00%         | 0,80%                        | 0,00%          | 0,8%  |
| Demanda Final                 | 0,01%         | 0,00%            | 0,03%      | 0,00%         | 0,41%                        | 0,00%          | 0,4%  |

|               |       |       |       |       |       |       |      |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| Demanda total | 0,36% | 0,01% | 0,28% | 0,01% | 0,62% | 0,01% | 1,3% |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|

Fonte: Elaboração própria com base dos dados da MIP 2015 (IBGE)

A abertura dos setores de biofertilizantes, biodefensivos e biocompostagem exigiu a definição específica das margens de comércio, de transporte e dos impostos, de modo a preservar a coerência contábil da estrutura numérica do modelo. Para os setores de biofertilizantes e biodefensivos, o procedimento adotado partiu da desagregação dos respectivos setores-mãe, a saber, adubos e fertilizantes e defensivos agrícolas e desinfetantes domissanitários.

Inicialmente, foi utilizada a Tabela 5, construída a partir do detalhamento das informações disponíveis nas bases apresentadas nos apêndices desse trabalho, que permitiram identificar a participação relativa dos biofertilizantes e biodefensivos no valor total dos setores-mãe.

Com base nessa oferta desagregada, as margens de comércio e de transporte associadas aos biofertilizantes e biodefensivos foram calculadas adotando-se o mesmo padrão de participação observado nos setores-mãe, de modo que a estrutura relativa dessas margens fosse preservada após a abertura setorial. Procedimento análogo foi aplicado aos impostos sobre produtos, que foram atribuídos aos novos setores proporcionalmente à participação estimada de cada um no valor total do setor de origem.

**Tabela 5 - Participação (%) dos setores de bioinsumos frente aos setores de insumos químicos**

|      | <b>Participação<br/>Biodefensivos/agrotóxicos</b> | <b>Participação<br/>Biofertilizantes/fertilizantes</b> |
|------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| 2015 | 0,53%                                             | 0,6%                                                   |
| 2016 | 0,63%                                             | -                                                      |
| 2017 | 0,92%                                             | 2,2%                                                   |
| 2018 | 1,11%                                             | 0,9%                                                   |
| 2019 | 0,87%                                             | 1,7%                                                   |
| 2020 | 0,85%                                             | 4,1%                                                   |
| 2021 | 4,35%                                             | 4,7%                                                   |
| 2022 | 3,60%                                             | 3,7%                                                   |
| 2023 | 2,73%                                             | 4,2%                                                   |

Fonte: Elaboração própria com base em dados do IBAMA (2024); ANDA (2024); CropLife (2024).

No caso do setor de água, esgoto, reciclagem e gestão de resíduos, a abertura do setor específico de biocompostagem seguiu abordagem distinta. A participação desse setor foi

definida com base na literatura (Bartelings, Verma e Boysen-Urban, 2021) utilizada no âmbito da tese, que considera uma participação de 2% desse segmento no valor total do setor-mãe. A partir dessa proporção, foram atribuídos à biocompostagem os valores correspondentes de oferta, bem como as margens de comércio, transporte e impostos, mantendo-se a proporcionalidade observada no setor agregado.

Esse procedimento assegura que a abertura dos novos setores seja consistente com a estrutura original da MIP de 2015, preservando as identidades contábeis do modelo e garantindo compatibilidade entre produção, margens e impostos no processo de desagregação setorial.

#### 4.6.4 Acomodação do baseline (2015-2023)

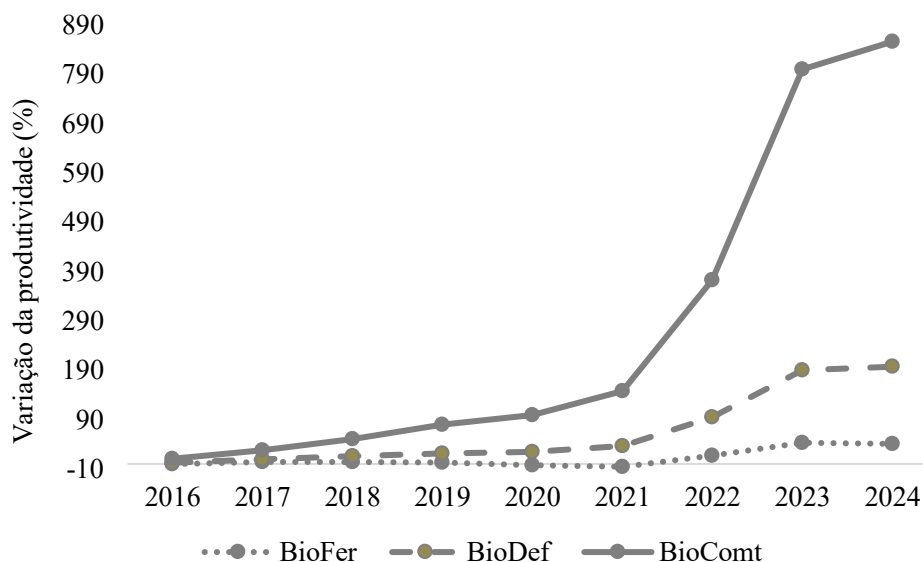
A partir da diagonalização do modelo, pode-se identificar a tendência do baseline para os setores de biofertilizantes, biodefensivos e biocompostagem no modelo BIO-BR. Utilizou-se uma estratégia de aproximação baseada em setores industriais correlatos da Tabela de Recursos e Usos (TRU) do Sistema de Contas Nacionais do IBGE, dado que esses segmentos não são reportados de forma desagregada nas estatísticas oficiais. Como *proxies*, foram utilizados os setores de Fabricação de químicos orgânicos e inorgânicos; Fabricação de defensivos, desinfestantes, tintas e químicos diversos; e Água, esgoto e gestão de resíduos. Para cada setor, foram coletados o VBP a preços correntes, o VBP a preços do ano anterior e o índice de preços anual, permitindo o cálculo do índice de preços acumulado. A partir desse índice, deflacionou-se o VBP para preços constantes de 2010, o que possibilitou derivar a variação anual, o índice ano-ano, o índice acumulado e, por fim, a variação percentual acumulada no período 2015–2021. Essa variação acumulada em termos constantes foi utilizada como parâmetro para representar a trajetória de crescimento real dos segmentos de bioinsumos no baseline, constituindo o choque exógeno aplicado ao modelo para captar sua evolução estrutural em ausência de políticas adicionais.

No caso dos setores de biofertilizantes, biodefensivos e biocompostagem, os dados disponíveis para os anos de 2022 e 2023 indicaram níveis de crescimento acumulado significativamente elevados. Essa elevação, contudo, decorre da ausência de informações consistentes para o período de 2015 a 2021, o que impede a construção de uma trajetória histórica contínua de variação real para esses segmentos. Quando tais valores foram diretamente incorporados ao baseline, os choques resultantes tornaram-se excessivamente intensos, ultrapassando a capacidade de estabilidade e convergência do modelo de EGC. Para contornar

essa limitação, adotou-se como referência o fator de crescimento real acumulado derivado da evolução dos setores *proxies* (aqueles mais próximos aos segmentos de bioinsumos na Tabela de Recursos e Usos (considerando o último ano com dados disponíveis). A proporção relativa entre biofertilizantes, biodefensivos e biocompostagem foi utilizada para ajustar o baseline por meio da variável de produtividade, de modo que a distribuição do crescimento estimado para 2023 refletisse as participações setoriais calculadas. Esse procedimento permitiu validar a base utilizada e assegurar a coerência dos choques aplicados no modelo, evitando distorções e garantindo uma trajetória plausível para os setores de bioinsumos.

A Figura 16 apresenta a trajetória da variação da produtividade dos setores de bioinsumos ao longo da simulação de baseline, a partir da aplicação do choque, responsável por ajustar a produtividade primária dos setores no modelo. Os resultados evidenciam trajetórias bastante diferenciadas entre biofertilizantes, biodefensivos e biocompostagem, refletindo tanto as dinâmicas setoriais específicas quanto a calibração realizada com base no fator de crescimento real acumulado derivado dos setores *proxies*.

**Figura 16 - Variação produtividade dos bioinsumos, 2015-2024**



Fonte: Resultados da pesquisa – Modelo BIO-BR

Para biofertilizantes, observa-se uma evolução moderada, com oscilações leves nos primeiros anos, avanço expressivo após 2021 e um pico em 2023, seguido de pequena acomodação em 2024. No caso dos biodefensivos, a tendência é nitidamente acelerada: a produtividade cresce de forma contínua de 2016 a 2021 e se intensifica substancialmente a

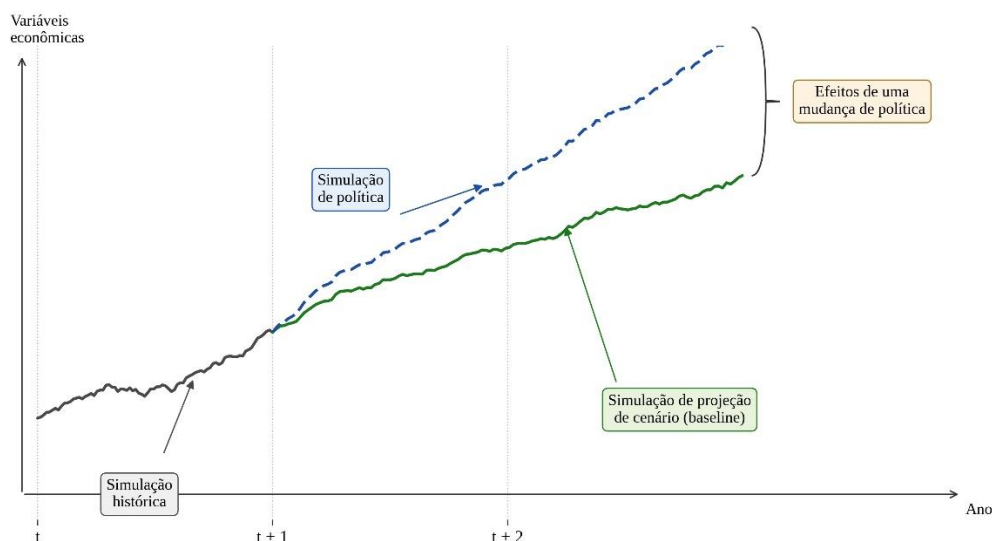
partir de 2022, alcançando variações superiores a 190% em 2023 e mantendo trajetória ascendente. Já o setor de biocompostagem exhibe o crescimento mais acentuado entre os três segmentos. A variação da produtividade se amplia de forma progressiva desde 2016, mas se acelera fortemente após 2021, atingindo valores superiores a 800% em 2023 e ultrapassando 850% em 2024. Essa dinâmica decorre da redistribuição do fator de crescimento acumulado proporcionalmente à participação de cada segmento, conforme exigido para a reconstrução do baseline. Desse modo, a Figura 16 evidencia como a calibração por meio da variável produção de *commodities* permite corrigir a ausência de séries históricas diretas para os bioinsumos, preservando coerência interna e garantindo que os níveis de produtividade em 2024 reflitam as proporções e tendências calculadas a partir da base metodológica estabelecida.

#### 4.7 Cenários de simulação

De acordo com Horridge (2002), a estrutura do ORANIG-RD permite que a economia seja projetada a partir de dois caminhos. O primeiro é o cenário de referência, construído para refletir uma evolução econômica considerada plausível no longo prazo. O segundo é o cenário de intervenção, no qual são aplicados choques ou alterações de política que rompem com a trajetória definida no cenário de referência. Para formular esses cenários, é necessário ampliar o conjunto de informações do modelo, incorporando dados adicionais sobre o estoque de capital e estimativas exógenas para variáveis futuras, como progresso tecnológico, níveis de emprego e preços de importação. A comparação entre as simulações do cenário de referência e as do cenário de intervenção permite identificar o efeito isolado das mudanças de política sobre a economia.

Os modelos EGC são compostos por um sistema de equações, em que o número de variáveis supera o número de equações. Nesse sentido, para que o sistema tenha solução matemática, algumas variáveis devem ser definidas exogenamente (variáveis que recebem choques). O fechamento, em modelos EGC, representa o processo de definição dessas variáveis, sendo possível ter diferentes fechamentos para simular impactos de curto e longo prazo (Dixon e Rimmer, 2002). Em modelos EGC de dinâmica recursiva existem quatro tipos de simulações geradas por seus respectivos fechamentos, sendo histórica, de decomposição, de cenário futuro e de política (Betarelli Junior, 2013; Proque, 2019), conforme Figura 17.

**Figura 17 - Simulações em modelos EGC dinâmicos**



Fonte: Betarelli Junior (2013)

A simulação histórica muda cada um dos coeficientes do modelo no ano  $t$  para os seus valores no ano  $t+1$ , mostrando o panorama da economia brasileira no período seguinte. A partir do último ano para o qual existem dados históricos disponíveis, passa-se a empregar a simulação de projeção de cenários (*forecast simulation*), a qual gera uma representação prospectiva da economia (Dixon; Rimmer, 2002). Dessa maneira, a simulação histórica atualiza o banco de dados, permitindo novas projeções futuras, enquanto a simulação de projeção de cenários utiliza outras informações econômicas originadas por projeções, como as macroeconômicas.

Desse modo, a simulação histórica tem como objetivo atualizar a base de dados original de 2015 com os recentes desenvolvimentos na economia. A simulação de política, por sua vez, mostra os desvios de trajetória medidos para avaliar os efeitos de um choque de política em períodos futuros. Em uma simulação de política é permitido analisar os desdobramentos de uma mudança na política econômica, sendo esta, um desvio dos indicadores econômicos em relação ao cenário de referência (Dixon; Rimmer, 2002; Betarelli Junior, 2013; Proque, 2019). Desse modo, é possível ter uma trajetória mostrando como a variável muda ao longo do tempo sem considerar a política do estudo, e por outro lado, uma trajetória de como a variável se comporta com a política em vigor (Magalhães, 2013).

#### 4.7.1 Cenário de referência

O cenário de referência, também conhecido como baseline do modelo é composto por um cenário macroeconômico, ou mais precisamente, as variações reais dos principais componentes da demanda final observáveis até 2024 e previstas até 2050. Os dados observados compreendem estatísticas do Sistema de Contas Nacional (SCN) do IBGE. A Tabela 6 fornece o cenário macroeconômico entre 2016 e 2025 utilizado para as simulações dos fechamentos de cenário no modelo, bem como as previsões de 2026 a 2050. Na medida em que este cenário representa as mudanças previstas na economia brasileira ao longo do tempo, o baseline reproduz a própria trajetória da economia sem o instrumento de política.

**Tabela 6 - Variações reais (%) dos principais indicadores macroeconômicos**

| Indicadores econômicos | Observado |      |      |      |      |      |      |      |      |      | Prospectivo <sup>1</sup> |
|------------------------|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------------------------|
|                        | 2016      | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 | 2026-2050 (a.a.)         |
| PIB                    | -3,3      | 1,3  | 1,8  | 1,2  | -3,3 | 4,8  | 3    | 3,2  | 3,3  | 2,3  | 2,2                      |
| Consumo das famílias   | -3,8      | 2    | 2,4  | 2,6  | -4,6 | 3    | 4,2  | 3,2  | 5,1  | 1,3  | -                        |
| Gastos do governo      | 0,2       | -0,7 | 0,8  | -0,4 | -3,7 | 3,5  | 2,1  | 3,8  | 2,1  | 2,1  | 2,2                      |
| Exportações            | 0,9       | 4,9  | 4,1  | -2,6 | -2,3 | 4,4  | 5,7  | 8,9  | 4,1  | 6,1  | -                        |
| Investimentos          | -12,1     | -2,6 | 5,2  | 4    | -1,8 | 12,9 | 1,1  | -3   | 6,6  | 2,9  | -                        |
| Emprego Nacional       | -1,6      | 1,3  | 2,7  | 1,6  | -6,4 | 5,8  | 3,8  | 1,6  | 2,8  | -    | -                        |
| Emprego Tendencial     | 2,2       | 2,2  | 2,2  | 2,2  | 2,2  | 2,2  | 2,2  | 2,2  | 2,2  | 2,2  | 2,2                      |
| População              | 0,8       | 0,7  | 0,7  | 0,6  | 0,7  | 0,6  | 0,4  | 0,4  | 0,4  | 0,4  | 0,7                      |

Fonte: IBGE (2021; 2022); Brasil (2020); Funcex (2023)

Nota: <sup>1</sup> Valores ocultos ("-") denotam que as variáveis são endógenas no período.

Nesse sentido, o cenário-base é o cenário usual, que mostra a previsão para a economia brasileira até 2050, sem qualquer política ou intervenção no setor bioinsumos. Os pressupostos sobre os principais fatores são: projeção da taxa de crescimento anual do PIB de 2,2% para 2026-2050, e taxa de crescimento populacional de 0,7% para o mesmo período. Entre 2016 e 2025, o consumo das famílias passou de -3,8% para 1,3%, o os gastos do governo de 0,2% para 2,1%, com grandes oscilações anuais. A trajetória de crescimento dos investimentos apresentou grande instabilidade se comparada aos demais indicadores, considerando o mesmo período.

As observações macroeconômicas mostram que no período de 2016 a 2025 houve elevação das exportações e dos investimentos, denotando melhorias na economia. O consumo das famílias recuperou-se nos pós pandemia, alcançando valores superiores ao momento que antecede a crise sanitária. Entretanto, neste mesmo período, as exportações registraram crescimento expressivo, quando comparadas com as de 2016 (6,1%).

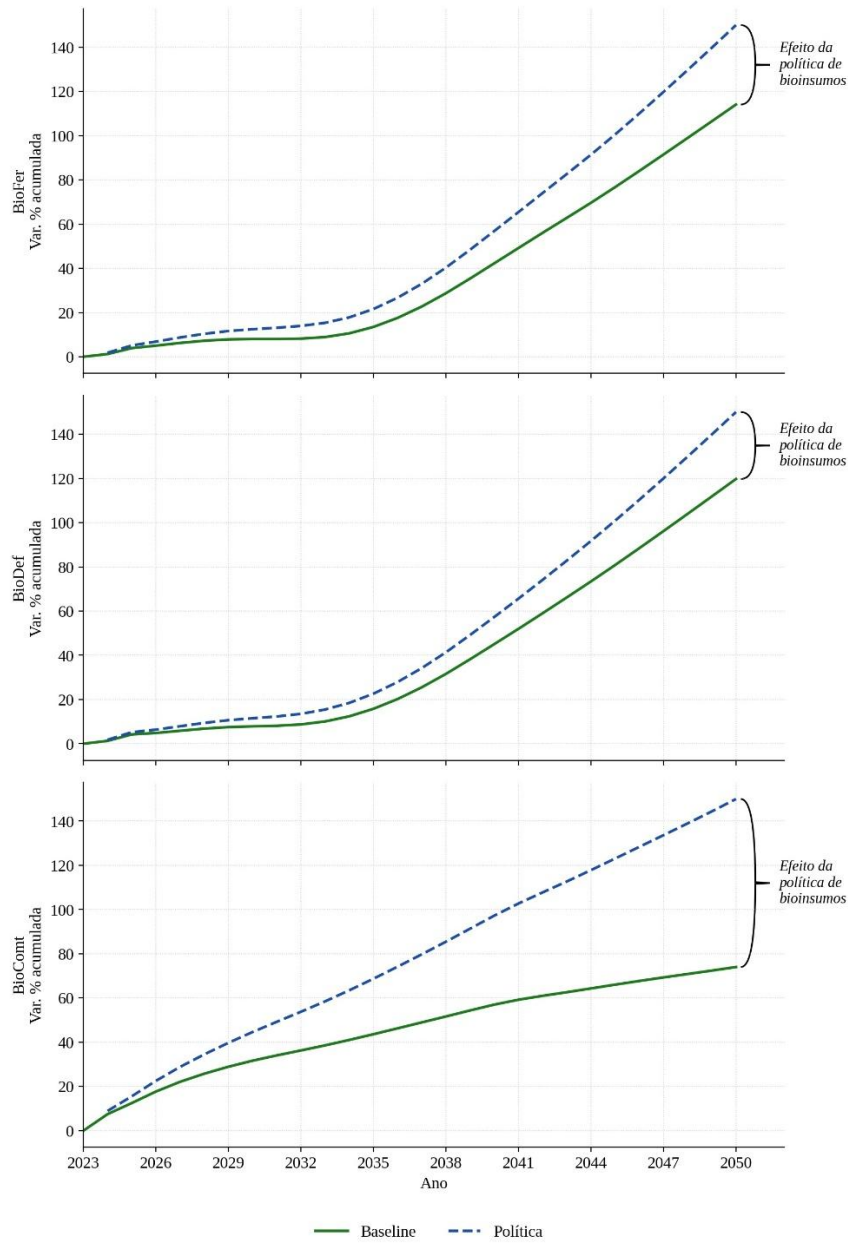
Destaca-se ainda que para a análise dos desvios do fechamento de política em relação a este baseline, operacionalmente este deve se tornar endógeno. As variáveis que foram exógenas no fechamento baseline serão endógenas para o modelo. A finalidade desta fase, conhecida como *baseline-rerun*, é gerar efeitos tendenciais sobre o sistema produtivo brasileiro para comparar com uma política específica adotada.

De acordo com o quadro de variáveis macroeconômicas que pode ser consultado no Apêndice A, as variáveis observadas que recebem choques na simulação histórica são o PIB pela ótica do dispêndio, o investimento real agregado, o consumo das famílias, o índice do volume de exportações e a demanda agregada real do governo. Destaca-se que a produtividade associada ao aumento da eficiência técnica do fator terra não foi incorporada no baseline. Cada uma dessas variáveis possui sua respectiva contrapartida endógena, conforme indicado no quadro, permitindo que o modelo reproduza a trajetória observada da economia por meio de ajustes internos consistentes.

#### 4.7.1 Fechamento de política (*Policy Closure*)

O fechamento de política define as condições específicas sob as quais a intervenção é simulada. Enquanto o fechamento base estabelece o ambiente macroeconômico de referência, reproduzindo a trajetória histórica e fixando as hipóteses para o período de projeção, o fechamento de política sobrepõe a esse ambiente um conjunto de alterações que permitem implementar os choques e definir as regras de ajuste fiscal. A Figura 18 apresenta o detalhamento dos cenários baseline e de política sob o qual foram construídos os fechamentos do modelo BIO-BR.

No contexto desta Tese, a política consiste em verificar os efeitos de uma política de subsídios, ofertados aos setores que compõem os bioinsumos no modelo BIO-BR, a partir de contrapartidas fiscais diferentes.

**Figura 18 – Cenários baseline e de política do Modelo BIO-BR, 2023-2050**

Fonte: Resultados da pesquisa – Modelo BIO-BR

Formalmente, o instrumento de política é a variação na alíquota dos subsídios ( $\Delta\tau_i$ ). A receita do imposto de produção do setor  $i$  é dada por:

$$\Delta R_i = \tau_i \cdot \Delta C_i + C_i \cdot \Delta\tau_i + \varphi \cdot V_i \quad (13)$$

Em que  $\Delta R_i$  é a variação na receita do imposto de produção do setor  $i$ ,  $\tau_i$  é a alíquota vigente,  $\Delta C_i$  é a variação no custo de produção,  $C_i$  é o custo de produção no nível inicial,  $\Delta\tau_i$  é

a variação na alíquota de subsídios,  $V_i$  é o valor bruto da produção e  $\varphi$  é um deslocador geral de tributos<sup>5</sup> (Cardoso, 2020). O primeiro termo captura o efeito-base: a variação na arrecadação decorrente de mudanças no custo de produção, mantida a alíquota constante. O segundo termo captura o efeito-alíquota: a variação na arrecadação decorrente da mudança na alíquota, ao custo inicial. O terceiro termo permite que um ajuste tributário uniforme incida sobre todos os setores. Ao tornar a alíquota exógena para os três setores de bioinsumos, o modelador aplica um choque negativo em  $\Delta\tau_i$  que equivalente a um subsídio e observa como o nível de atividade desses setores responde endogenamente ao estímulo. O modificador fiscal geral para impostos diretos e indiretos (ftaxgen) desempenha um papel importante, pois é uma variável "livre", exógena, que se relaciona ao sistema tributário completo do modelo, razão pela qual é crucial avaliar a dinâmica fiscal de um experimento.

Além do mecanismo de subsídio, o fechamento de política pode ativar o canal de produtividade da terra associado ao uso de fertilizantes químicos e biofertilizantes. A produtividade efetiva da terra em cada setor é representada por:

$$A_{i,x}^T = \bar{A}_{i,x}^T - \Phi_{i,x}^\varphi - \Phi_{i,x}^B \quad (14)$$

de maneira que  $A_{i,x}^T$  é a produtividade da terra no setor  $i$  no período  $t$ ,  $\bar{A}_{i,x}^T$  é o componente estrutural de progresso técnico,  $\Phi_{i,x}^\varphi$  é o efeito associado aos fertilizantes químicos e  $\Phi_{i,x}^B$  é o efeito associado aos biofertilizantes. Na convenção algébrica do modelo, esses efeitos aparecem como termos de ajuste; economicamente, eles representam o canal pelo qual o uso de insumos agrícolas altera a eficiência do fator terra.

O efeito dos fertilizantes químicos é especificado de forma log-linear, pela equação:

$$\Phi_{i,x}^\varphi = -\beta^\varphi \cdot Q_{i,x} + \eta_i^\varphi \quad (15)$$

sendo  $Q_{i,x}$  representa o uso setorial de fertilizantes químicos no setor  $i$  e no ano  $x$ ,  $\beta^\varphi$  é o parâmetro que mede a sensibilidade da produtividade da terra a esse uso (estimado no Capítulo 3 desta Tese) e  $\eta_i^\varphi$  é um termo autônomo de deslocamento. O sinal negativo decorre da

---

<sup>5</sup> Na implementação GEMPACK do modelo, a equação (1) corresponde a:  $\text{delV1PTX}(i) = \text{PTXRATE}(i) \cdot \text{delVICST}(i) + \text{VICST}(i) \cdot \text{delIPTXRATE}(i) + 0.01 \cdot \text{V1TOT}(i) \cdot \text{ftaxgen}$ , em que  $\text{delV1PTX} \equiv \Delta R$ ,  $\text{PTXRATE} \equiv \tau$ ,  $\text{delVICST} \equiv \Delta C$ ,  $\text{VICST} \equiv C$ ,  $\text{delIPTXRATE} \equiv \Delta \tau$ ,  $\text{V1TOT} \equiv V$  e  $\text{ftaxgen} \equiv \varphi$ .

formulação dual adotada, na qual a expansão do uso do insumo se traduz em ganho de eficiência da terra empregada.

Para os biofertilizantes, o efeito é ponderado pela participação relativa desse insumo em relação aos fertilizantes químicos:

$$\Phi_{i,x}^B = -[\beta^B \cdot (B_{i,x} / Q_{i,x}) \cdot B_{i,x}] + \eta_i^B \quad (16)$$

Em que  $B_{i,x}$  representa o uso setorial de biofertilizantes,  $\beta^B$  é o parâmetro associado ao efeito produtivo dos bioinsumos e  $\eta_i^B$  é o deslocamento autônomo correspondente. Essa formulação torna o impacto dos biofertilizantes heterogêneo entre setores: o ganho de produtividade depende tanto do volume utilizado quanto da importância relativa do biofertilizante face ao insumo químico na estrutura de custos setorial observada no ano-base. Setores em que os biofertilizantes já representam parcela expressiva do gasto com fertilizantes tendem, portanto, a apresentar resposta mais intensa ao choque, enquanto setores com baixa adoção prévia transmitem efeito proporcionalmente menor.

Cabe ressaltar que a estrutura de fechamento do modelo diferencia dois conjuntos de setores conforme o mecanismo de transmissão (Figura 19). Para fertilizantes químicos e biofertilizantes, incorporamos choques de produtividade da terra calculados externamente, refletindo o impacto documentado na literatura sobre o efeito desses insumos sobre a eficiência produtiva. Os setores de biodefensivos e biocompostagem participam da simulação por meio da expansão exógena de sua atividade, transmitindo efeitos ao restante da economia pelos encadeamentos intersetoriais e pela recomposição da demanda, mas sem choques de produtividade específicos.

Além do bloco tecnológico, o fechamento contempla hipóteses alternativas para o orçamento público, que constituem a segunda dimensão de diferença entre os cenários de política. Na especificação de referência, o gasto do governo acompanha a trajetória do PIB, o que pode ser representado, de forma sintética, por:

$$G_x = \lambda \cdot Y_x \quad (17)$$

Em que  $G_x$  é o gasto real do governo,  $Y_x$  é o PIB real e  $\lambda$  é um parâmetro de proporcionalidade. Essa hipótese permite avaliar os efeitos da política em um ambiente no qual o gasto público evolui em linha com o crescimento da economia, sem que a perda de

arrecadação decorrente do subsídio seja compensada por qualquer instrumento específico. O custo fiscal é, implicitamente, absorvido por endividamento público ou pela tolerância a um déficit marginalmente maior.

As demais hipóteses fiscais podem ser organizadas a partir da razão entre poupança do governo e PIB:

$$\sigma_x = S_x^g / Y_x \quad (18)$$

Onde  $S_x^g$  representa a poupança do governo. No cenário de orçamento livre,  $\sigma_x$  é endógena e pode variar ao longo da simulação, refletindo integralmente o impacto fiscal do subsídio sem qualquer mecanismo compensatório. Esse cenário funciona como um ponto de referência mais básico, permitindo mensurar o custo fiscal bruto da política. No cenário de equilíbrio fiscal via tributação, impõe-se a restrição com ajuste das receitas tributárias:

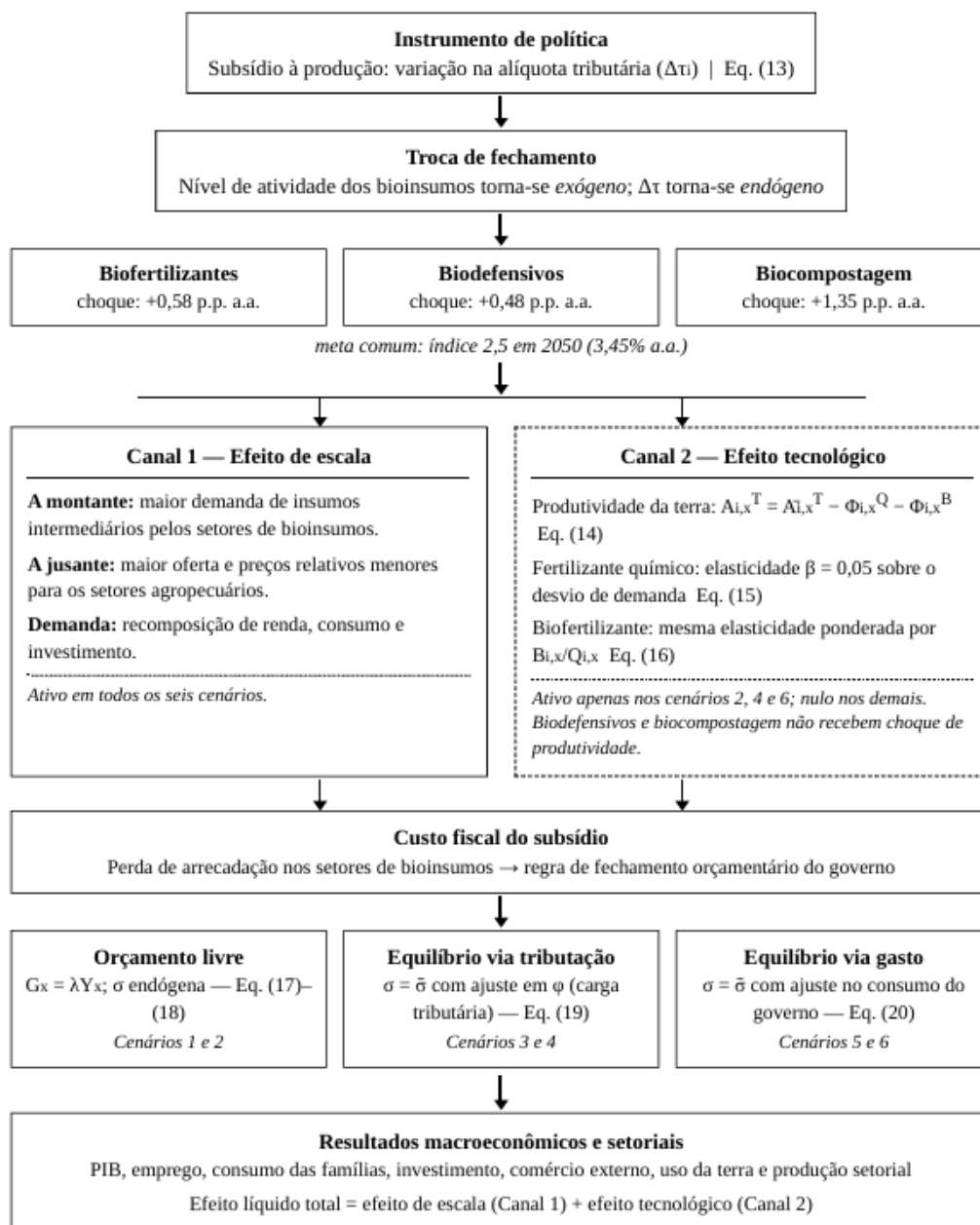
$$\sigma_x = \bar{\sigma} \quad (19)$$

A variável de ajuste é o deslocador geral de impostos ( $\varphi$  da equação 13), que eleva uniformemente a carga tributária sobre todos os setores da economia até que a perda de arrecadação seja integralmente compensada. Nesse cenário, é a sociedade como um todo que financia o subsídio, por meio de preços mais elevados e menor competitividade, enquanto os demais compromissos governamentais (transferências, gastos com pessoal, investimentos públicos) permanecem inalterados. Já no cenário de equilíbrio fiscal via gasto, a mesma condição de poupança constante é preservada, mas o ajuste recai inteiramente sobre o consumo do governo:

$$\sigma_x = \bar{\sigma} \quad (20)$$

Quando o subsídio reduz a arrecadação, os gastos públicos se contraem na mesma proporção, sem que as alíquotas tributárias sejam alteradas. Esse cenário é o mais restritivo do ponto de vista fiscal, pois gera um efeito de deslocamento direto: a redução da arrecadação nos setores de bioinsumos provoca contração dos gastos públicos, que por sua vez reduz a demanda agregada do governo. Há, ainda, a alternativa em que o gasto público acompanha a arrecadação tributária, permitindo que a despesa pública flutue de acordo com o comportamento das receitas, sem necessariamente manter fixa a razão poupança/PIB.

**Figura 19 - Mecanismo de transmissão da política de bioinsumos no Modelo BIO-BR**



Nota: linha contínua indica mecanismo ativo em todos os cenários; linha tracejada, mecanismo condicional à ativação do canal de produtividade da terra.

Fonte: elaboração própria a partir do Modelo BIO-BR.

A combinação dessas dimensões dá origem a seis cenários de política, organizados em três pares que se distinguem pelo regime de fechamento orçamentário do governo. Cada cenário pode ser consultado no Quadro 10.

**Quadro 10 – Estrutura dos seis cenários de simulação da política de bioinsumos**

| Cenário                                                                                   | Choque                                                                                                                                                                               | Detalhes                                                                                                                                                                                                                                         |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Cenário 1:</b> orçamento livre (2024 - 2050)                                           | Aumento acumulado de produtividade nos setores de bioinsumos (BioFer: 0,58%; BioDef: 0,48%; BioComt: 1,35% a.a.), via ashock x1tot.                                                  | Efeito dos subsídios ofertados aos bioinsumos sem restrição no orçamento público e sem efeitos de produtividade da terra                                                                                                                         |
| <b>Cenário 2:</b> orçamento livre e Produtividade da terra (2024 - 2050)                  | Aumento acumulado de produtividade nos setores de bioinsumos (BioFer: 0,58%; BioDef: 0,48%; BioComt: 1,35% a.a.), via ashock x1tot. Choque exógeno na produtividade da terra (a1lnd) | Efeito dos subsídios ofertados aos bioinsumos sem restrição no orçamento público acrescentados os efeitos de produtividade da terra.                                                                                                             |
| <b>Cenário 3:</b> orçamento equilibrado por taxaço (2024 - 2050)                          | Aumento acumulado de produtividade nos setores de bioinsumos (BioFer: 0,58%; BioDef: 0,48%; BioComt: 1,35% a.a.), via ashock x1tot.                                                  | O saldo orçamentário em relação ao PIB se mantém constante. A compensação orçamentária ocorre a partir de um aumento proporcional na receita tributária pela mudança na alíquota de imposto.                                                     |
| <b>Cenário 4:</b> orçamento equilibrado por taxaço e produtividade da terra (2024 - 2050) | Aumento acumulado de produtividade nos setores de bioinsumos (BioFer: 0,58%; BioDef: 0,48%; BioComt: 1,35% a.a.), via ashock x1tot. Choque exógeno na produtividade da terra (a1lnd) | O saldo orçamentário em relação ao PIB se mantém constante. A compensação orçamentária ocorre a partir de um aumento proporcional na receita tributária pela mudança na alíquota de imposto acrescentados aos efeitos da produtividade da terra. |
| <b>Cenário 5:</b> orçamento equilibrado por gastos (2024 - 2050)                          | Aumento acumulado de produtividade nos setores de bioinsumos (BioFer: 0,58%; BioDef: 0,48%; BioComt: 1,35% a.a.), via ashock x1tot.                                                  | O saldo orçamentário em relação ao PIB se mantém constante. Contudo, diferentemente do Cenário 3, a compensação orçamentária ocorre a partir da redução dos demais itens de consumo do governo.                                                  |
| <b>Cenário 6:</b> orçamento equilibrado por gastos e produtividade da terra (2024 - 2050) | Aumento acumulado de produtividade nos setores de bioinsumos (BioFer: 0,58%; BioDef: 0,48%; BioComt: 1,35% a.a.), via ashock x1tot. Choque exógeno na produtividade da terra (a1lnd) | O saldo orçamentário em relação ao PIB se mantém constante e a compensação orçamentária ocorre a partir da redução dos demais itens de consumo do governo. Acrescidos a isso os efeitos da produtividade da terra.                               |

Fonte: Modelo BIO-BR

Os cenários de orçamento livre sem produtividade, orçamento equilibrado via taxaço e via gastos ativam apenas o mecanismo de expansão exógena dos bioinsumos por meio da troca de fechamento que torna o nível de atividade exógeno e a alíquota de subsídio ( $\Delta\tau$ ) endógena para os três setores (biofertilizante; biodefensivo; e biocompostagem), mantendo desativado o canal de produtividade da terra. Os demais reproduzem a mesma estrutura, mas com o canal de produtividade da terra ligado, ou seja, com as equações (15) e (16) operando

por meio do choque tecnológico  $A_{i,x}^T$ . Os cenários sem e com produtividade fornecem o efeito líquido total da política de bioinsumos sob o respectivo regime fiscal (orçamento livre e orçamento equilibrado), decompondo-o em duas parcelas aditivas: o efeito de escala, sem produtividade, e o efeito tecnológico, com canal da produtividade.

Em síntese, o fechamento de política articula três dimensões centrais. A primeira é a expansão exógena dos setores de biofertilizantes, biodefensivos e biocompostagem, implementada por meio de subsídios. A segunda é a ativação, ou não, do efeito da produtividade da terra associado ao uso de fertilizantes químicos e biofertilizantes, conforme as equações (2) a (4). A terceira é a escolha da regra fiscal, que pode assumir a forma de orçamento livre, com gasto público acompanhando o PIB, equilíbrio fiscal via receita (tributação) ou equilíbrio fiscal pelo lado da despesa (via gasto).

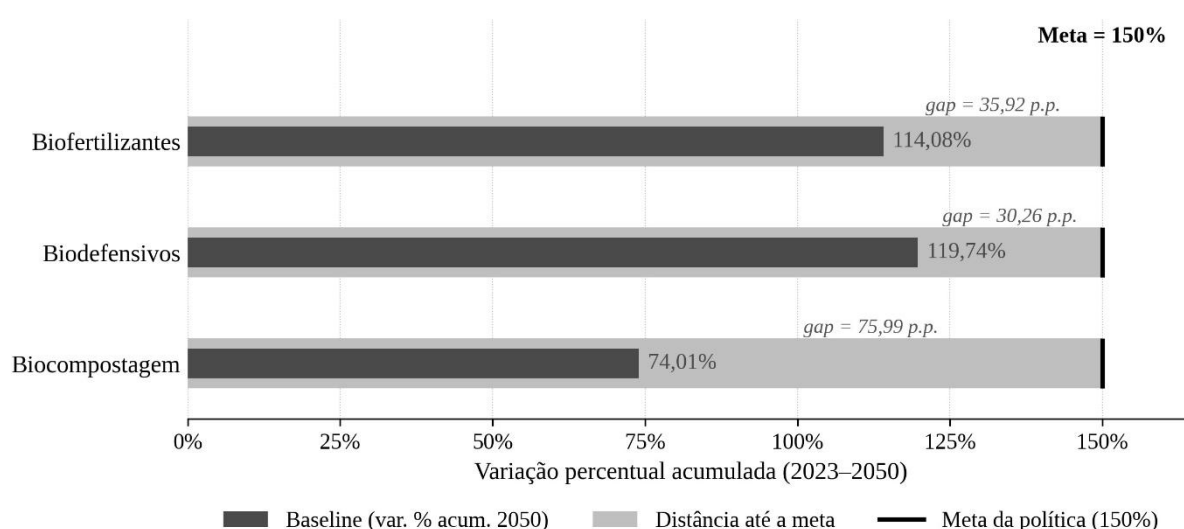
O contraste entre cenários com e sem o canal de produtividade da terra permite separar o efeito de escala, decorrente apenas da maior oferta de bioinsumos, do efeito tecnológico, associado ao ganho de produtividade que essa oferta induz; a soma de cada par fornece o efeito líquido total e sua decomposição aditiva nessas duas parcelas. A variação da regra fiscal, por sua vez, evidencia que um mesmo choque setorial produz resultados macroeconômicos distintos conforme a forma de financiamento do subsídio: sob orçamento livre, mede-se o efeito da política sem a contrapartida de ajuste fiscal; sob equilíbrio via tributação, incorpora-se o custo de elevar a carga tributária para financiá-la; e sob equilíbrio via despesa, captura-se o efeito do deslocamento de gasto público. Dessa forma, essa estratégia permite identificar, de forma separada, os efeitos de escala, os efeitos tecnológicos e os efeitos fiscais associados à política de incentivo aos bioinsumos.

A simulação de política requer a definição de choques exógenos que representem a intervenção desejada. No Modelo BIO-BR, o objetivo é promover a expansão da produção dos três setores de bioinsumos de modo que cada um deles dobre de tamanho até 2050 em relação à base de 2023. Isso corresponde a uma taxa acumulada de expansão de 150%, ou, equivalentemente, a um índice acumulado de 2,5 (com base em 2023). A magnitude do choque foi calibrada em relação ao desempenho recente do setor. Entre 2018 e 2022, o mercado brasileiro de biodefensivos cresceu, em média, 63% ao ano, ante 12,5% da média internacional no mesmo período (Croplife Brasil, 2023), e o segmento expandiu-se 219% entre as safras 2019/20 e 2021/22 (S&P Global; Croplife Brasil, 2023). Ao distribuir uma expansão de 150% ao longo de quase três décadas, a meta estabiliza esse ritmo em um patamar estrutural de longo prazo. A indução dessa expansão por meio de subsídios fundamenta-se na natureza dos

bioinsumos como bens geradores de externalidades positivas, tais como a redução do uso de defensivos químicos, a melhoria da qualidade do solo e a mitigação de emissões. Nessas condições, o benefício marginal social excede o privado e o mercado oferta quantidade inferior à socialmente eficiente, cuja correção, na teoria das finanças públicas, se dá pelo subsídio pigouviano. A escolha corresponde ao desenho de incentivos vigente no Brasil, no qual o estímulo aos bioinsumos opera predominantemente por subvenção creditícia, com financiamento a taxas reduzidas no âmbito do RenovAgro e do Programa Nacional de Bioinsumos (Brasil, 2020).

A construção dos choques envolve três etapas: a obtenção da trajetória de referência (*baseline*) a partir do nível de atividade; o cálculo do desvio necessário para atingir a meta de política; e a calibração do choque adicional de política aplicado ao modelo. A primeira etapa consiste em obter a trajetória de crescimento de cada setor na ausência da política, isto é, no cenário de referência (Figura 20). Essa trajetória resulta da simulação do modelo com o fechamento base descrito na seção anterior, sem qualquer choque adicional sobre os setores de bioinsumos. Os resultados do baseline indicam que, entre 2023 e 2050, o nível de atividade dos três setores já apresenta crescimento espontâneo, decorrente da dinâmica geral da economia. O setor de biofertilizantes (BioFer) registra crescimento acumulado de 114,08% no baseline, atingindo um índice de 2,14. O setor de biodefensivos (BioDef) cresce 119,74%, com índice de 2,20. Já o setor de biocompostagem (BioComt) apresenta crescimento mais modesto, de 74,01%, com índice de 1,74.

**Figura 20 - Trajetória do baseline e meta de política**



Fonte: Resultados da pesquisa – Modelo BIO-BR

A meta de política estabelece que todos os três setores devem atingir um índice acumulado de 2,5 em 2050. Isso equivale a uma taxa acumulada de 150% em relação a 2023, ou seja, cada setor deverá ter dobrado de tamanho e ainda expandido em 50 pontos percentuais adicionais em relação à base. A taxa média anual uniforme necessária para alcançar esse índice ao longo de 27 anos (de 2024 a 2050) é obtida pela condição:

$$(1 + g)^{27} = 2,5 \quad (21)$$

cuja solução é:

$$g = 2,5^{1/27} - 1 \approx 0,03452 = 3,45\% \text{ a.a.} \quad (22)$$

Essa taxa anual é comum aos três setores, uma vez que todos devem convergir para o mesmo índice final. No entanto, como cada setor parte de uma trajetória de baseline diferente, o choque adicional de política deve ser calibrado individualmente.

O choque de política é definido como a diferença entre a taxa média anual necessária para atingir a meta e a taxa média anual já presente no baseline. Formalmente, seja  $g^b$  a taxa média anual do baseline e  $g^*$  a taxa necessária. O desvio adicional de política ( $\Delta g_i$ ) é:

$$\Delta g_i = g^* - g_i^b \quad (23)$$

Esse desvio é aplicado uniformemente em cada ano da simulação dinâmica como um choque acumulativo sobre o nível de atividade de cada setor<sup>6</sup>. A Figura 21 apresenta os valores calculados.

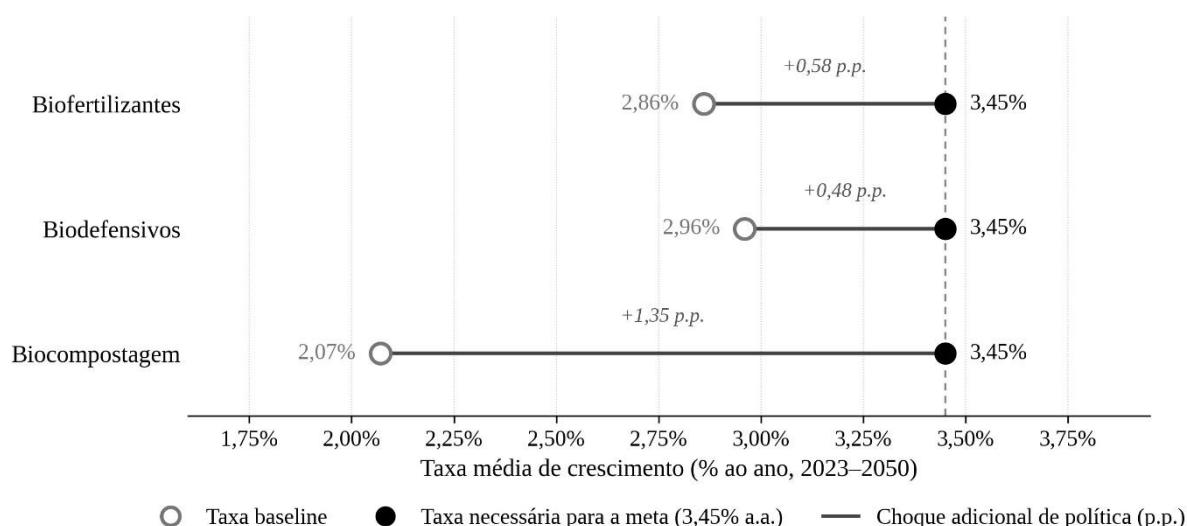
A magnitude do choque adicional varia consideravelmente entre os setores, refletindo as diferenças nas trajetórias de baseline (rever a Figura 18). O setor de biocompostagem (BioComt) requer o maior choque adicional de 1,35 pontos percentuais ao ano, pois sua trajetória de referência é a mais modesta entre os três (2,07% a.a.), distando significativamente da meta de 3,45% a.a. Em contraste, o setor de biofertilizantes (BioFer) necessita de um choque

---

<sup>6</sup> Na implementação GEMPACK, o choque é inserido por meio dos comandos: `ashock x1tot(BioFer) = 0.545`; `ashock x1tot(BioDef) = 0.457`; `ashock x1tot(BioComt) = 1.349`. O comando `ashock` aplica um choque acumulativo sobre a variável indicada em cada período da simulação dinâmica.

adicional de apenas 0,58 pontos percentuais, dado que sua trajetória de baseline já é relativamente próxima da meta (2,86% a.a.). O setor de biodefensivos (BioDef) situa-se em posição intermediária, com choque adicional de 0,48 pontos percentuais.

**Figura 21 - Cálculo do choque adicional de política de subsídios**



Fonte: Resultados da pesquisa – Modelo BIO-BR

No modelo EGC, o choque é implementado por meio da expansão exógena do nível de atividade setorial. A variável de nível de atividade representa a variação percentual no valor adicionado do setor  $i$ . Ao aplicar um choque acumulativo de  $\Delta g_i$  % ao ano sobre essa variável, o modelo força o nível de atividade do setor a crescer em  $\Delta g_i$  pontos percentuais além do que cresceria no baseline. Esse choque adicional se propaga pelo restante da economia por meio dos encadeamentos intersetoriais: os setores de bioinsumos demandam insumos intermediários de outros setores (efeito a montante), e os setores agrícolas que utilizam bioinsumos se beneficiam da maior oferta e dos preços reduzidos (efeito a jusante). Os efeitos macroeconômicos dependem, além da magnitude do choque, do fechamento de política adotado, conforme discutido na seção anterior.

A construção da trajetória de política na planilha de calibração segue uma lógica em duas camadas. Na primeira camada, a meta uniforme de crescimento é distribuída ao longo dos 27 anos do horizonte de simulação (2024–2050) por meio de um índice de crescimento acumulado com taxa constante de 3,45% ao ano. Esse índice parte de 1 em 2023 e atinge exatamente 2,5 em 2050. Na segunda camada, o índice de política é obtido pela multiplicação

do índice uniforme pela razão de desvio específica de cada setor, de modo a incorporar as diferenças nas trajetórias de baseline. Em 2024, por exemplo, o índice de política do setor BioFer é 1,17, resultado da composição entre o crescimento do baseline (1,24% naquele ano) e o choque adicional de política (0,58 p.p.). Em 2050, o índice atinge 2,5 para todos os três setores, confirmando que a calibração reproduz a meta estabelecida.

O perfil temporal do choque adicional é uniforme: o mesmo valor de  $\Delta g_i$  é aplicado em cada ano da simulação. No entanto, como a trajetória de baseline não é uniforme, os setores apresentam fases de aceleração e desaceleração ao longo do horizonte, a taxa total de crescimento (baseline mais política) varia ano a ano.

A consistência da calibração é verificada por meio de uma etapa de checagem, na qual o índice acumulado resultante da simulação de política é comparado à meta. Para os três setores, o índice acumulado atinge exatamente 2,5 em 2050, correspondendo a uma taxa acumulada de 150%, conforme especificado. Os resultados da simulação com os choques de política também confirmam essa convergência, validando a calibração realizada.

Os choques de produtividade da terra utilizados nas simulações foram calculados a partir das próprias trajetórias de demanda por fertilizantes geradas em cada cenário de política. O procedimento inicia-se com as variações percentuais anuais da demanda intermediária por fertilizante químico setorial, obtidas como desvios em relação ao baseline do Modelo BIO-BR. Sobre essas variações aplica-se a elasticidade de 0,05, estimada econometricamente no Capítulo 3 e descrita nas Equações 15 e 16, de modo que o desvio percentual no uso de fertilizante em cada setor  $i$  e em cada ano  $t$  é convertido em ganho de produtividade da terra. Em termos operacionais, o termo de produtividade de cada setor corresponde ao produto entre o coeficiente de elasticidade e a variação simulada na demanda por fertilizante químico daquele setor, o que assegura que a magnitude do choque seja proporcional à intensidade com que a política altera o emprego de insumos químicos. Após a obtenção dos ganhos anuais por setor, as séries são acumuladas e reorganizadas em uma matriz de anos por setores, que constitui o vetor de choque de produtividade da terra efetivamente lido pelo modelo em cada cenário simulado.

Para os biofertilizantes, a regra análoga reaplica a mesma elasticidade, ponderada pela razão entre o valor da demanda básica por biofertilizante e por fertilizante químico; essa ponderação se justifica porque a estimação econométrica do Capítulo 3 considerou apenas os fertilizantes químicos, de modo que o termo de razão ajusta a elasticidade à escala relativa do bioinsumo em cada setor. Como consequência, o choque de produtividade não é uniforme entre os setores: sua magnitude depende, em cada ramo agropecuário, tanto da intensidade com que

o uso de fertilizante e biofertilizante se expande quanto da participação relativa desses insumos na estrutura de custos setorial, captada pelos coeficientes da matriz de absorção. Setores com maior intensidade no uso de fertilizantes registram, portanto, ganhos de produtividade da terra mais expressivos, ao passo que setores em que esses insumos têm participação reduzida apresentam efeitos marginais. Essa distribuição setorial diferenciada propaga-se ao longo do horizonte de simulação à medida que a expansão dos bioinsumos avança, e manifesta-se apenas nos cenários em que o canal de produtividade é ativado; nos cenários de efeito de escala puro o choque de produtividade é nulo.

## 5 ANÁLISE DOS EFEITOS DE POLÍTICAS

Este capítulo apresenta e discute os resultados econômicos das simulações realizadas com o modelo BIO-BR. A análise dos seis cenários foi organizada de modo a privilegiar a leitura individual de cada fechamento de política, em coerência com o objetivo da tese de avaliar o setor de bioinsumos como setor estratégico e de examinar como diferentes instrumentos de política econômica podem repercutir sobre a economia brasileira. A interpretação sustenta-se, de um lado, nos resultados das simulações realizadas e das hipóteses adotadas, de outro, em literatura científica que ajuda a esclarecer os mecanismos econômicos, produtivos e institucionais associados aos bioinsumos.

O capítulo está estruturado em quatro seções. A primeira examina os resultados macroeconômicos, abrangendo os principais agregados nacionais sob cada cenário simulado. A segunda seção desloca a análise para o plano setorial, detalhando os efeitos sobre valor adicionado, investimento e comércio exterior dos diferentes ramos de atividade, com atenção especial ao setor de bioinsumos e às cadeias agropecuárias a ele vinculadas. A terceira seção investiga como os impactos se distribuem entre grupos de famílias, avaliando as implicações distributivas das políticas simuladas sobre a renda e o bem-estar das diferentes faixas de rendimento. Por fim, a quarta seção reúne as considerações gerais sobre o conjunto dos resultados, articulando as dimensões macro, setorial e distributiva para uma avaliação integrada dos cenários de política

### 5.1 Resultados macroeconômicos

Os resultados macroeconômicos dos seis cenários revelam trajetórias distintas, condicionadas pela escolha do instrumento de financiamento e pela presença ou ausência do efeito da produtividade. A análise examina os indicadores agregados de produto, investimento, consumo, mercado de trabalho, preços, setor externo e fiscal, em três horizontes temporais: curto prazo (2024–2030), médio prazo (2024–2039) e longo prazo (2024–2050). Conforme detalhado no capítulo anterior, os seis cenários cruzam três regimes de financiamento, orçamento livre, equilíbrio via taxação e equilíbrio via realocação de gastos, com a presença ou ausência do ganho de produtividade dos bioinsumos.

A Figura 22 apresenta a trajetória do PIB real em desvios acumulados (%) em relação ao cenário de referência (baseline), por tipo de cenário e evidencia uma hierarquia de resultados

que se organiza por dois eixos. O primeiro é o da restrição fiscal: orçamento livre dominam os cenários de orçamento equilibrado em todos os horizontes. O segundo é o ganho de produtividade: dentro de cada regime fiscal, sua presença sempre produz efeito maior (ou menos negativo), com uma única exceção, comentada adiante.

**Figura 22 - Trajetória do PIB real (Var.%) acumulado nos seis cenários**



Fonte: Resultados da pesquisa – Modelo BIO-BR

O ponto mais informativo está na discrepância entre os cenários sob orçamento livre. O cenário sem ganho de produtividade, produz impacto acumulado de 0,284% no PIB em 2050, superior ao cenário com produtividade (0,119%). Esse resultado indica que, sob orçamento livre, o maior efeito agregado vem do estímulo fiscal embutido no subsídio, não do ganho tecnológico.

O segundo contraste opõe taxaço e gastos, ambos sem produtividade: A taxaço produz -0,051% contra 0,034% da via gastos em 2050. Mantido constante o choque real, esses 0,085 pontos percentuais de diferença constituem a medida empírica, no contexto brasileiro, do custo de bem-estar dos tributos distorcivos (Auerbach, 1985) coerente com a literatura sobre perdas de eficiência da tributação marginal em economias de carga elevada (Cavalcanti & Vereda, 2014).

A diferença de resultados entre os cenários decorre de como cada fechamento transmite o choque de política pela estrutura de equilíbrio geral do modelo, e não de variação do choque primário, exógeno e idêntico em todos os arranjos. No cenário de subsídio via taxação sem produtividade, o equilíbrio orçamentário é obtido por meio do mecanismo de troca de variáveis descrito na especificação do governo, no qual o deslocador tributário geral, denominado *ftaxgen*, deixa de ser exógeno e passa a flutuar endogenamente, ao passo que a variável associada à poupança do governo é exogeneizada. Por essa permuta, qualquer variação na poupança pública decorrente do custo fiscal do subsídio é compensada por uma variação equivalente na tributação direta e indireta, de modo a manter constante a razão entre poupança do governo e produto interno bruto ao longo da trajetória.

Como a *ftaxgen* interage de forma transversal com a totalidade do sistema tributário, alcançando os impostos indiretos sobre o consumo intermediário, o investimento, as famílias, as exportações e o governo, bem como os impostos diretos sobre as corporações e sobre a renda, o ajuste eleva o preço efetivo dos fatores primários e desestimula a formação de capital. Esse é exatamente o efeito contracionista de longo prazo já previsto na própria documentação do fechamento do modelo, segundo a qual o ajuste integral via tributação tende a produzir resultados excessivamente contracionistas quando o produto e a poupança do governo apresentam padrões de crescimento distintos. Na ausência de qualquer ganho de eficiência que contrabalance essa retirada de poder de compra do setor privado, o efeito líquido sobre a atividade permanece negativo ao longo de todo o horizonte de simulação.

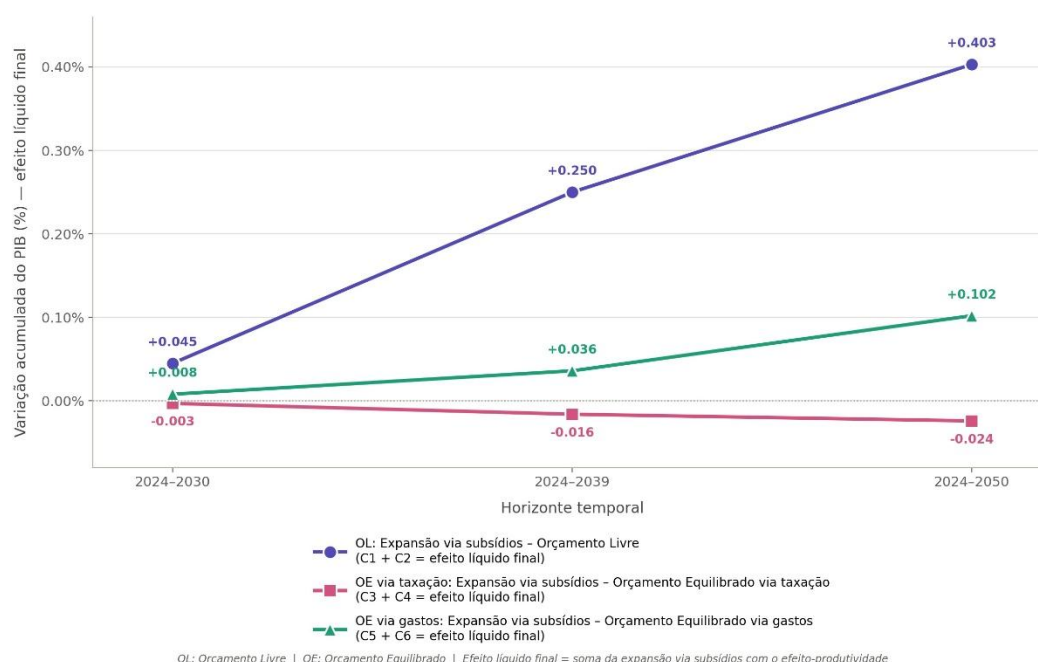
A incorporação do efeito-produtividade altera o resultado qualitativamente porque atua pela oferta, em ponto distinto daquele onde opera a restrição fiscal. O ganho tecnológico reduz o requerimento de insumos por unidade de produto nos setores que absorvem bioinsumos, diminuindo os custos primários, os preços básicos e melhorando a competitividade inclusive nas exportações. Pelos encadeamentos de insumo-produto, o efeito de oferta se propaga como maior atividade agregada. Como o ganho independe da arrecadação, não é anulado pela compensação tributária; no longo prazo, o efeito positivo de oferta supera a contração de demanda e inverte o sinal do impacto acumulado, que alcança 0,027% em 2050.

Essa inversão sugere que, sob equilíbrio via taxação, o ganho tecnológico é condição necessária para que a política deixe de ser contracionista, contrariando a hipótese de que subsídios setoriais seriam autofinanciáveis pelo crescimento que induzem: sem produtividade, o crescimento induzido é insuficiente para cobrir o custo fiscal, e o impacto permanece

negativo. É o contraste entre os dois cenários via taxaço que isola o valor econômico do efeito tecnológico, distinguindo a política de um subsídio genérico de igual magnitude.

Para sintetizar o resultado em um indicador próximo da decisão de política, a Figura 23 agrupa os cenários por regime. O efeito líquido soma estímulo e produtividade dentro de cada arquitetura e corresponde à resposta que o formulador efetivamente obtém ao implementar a política.

**Figura 23 - Trajetória do PIB real (Var.%) considerando os efeitos líquidos finais de cada regime orçamentário**



Fonte: Resultados da pesquisa — Modelo BIO-BR

O resultado central é a dispersão dos efeitos líquidos em 2050. Pois enquanto o orçamento livre acumula ganho de 0,403% do PIB, o orçamento equilibrado via gastos registra 0,102% e o orçamento equilibrado via taxaço registra perda de 0,024%. A distância entre o melhor e o pior arranjo fiscal é de 0,427 ponto percentual, valor cerca de dezessete vezes maior, em módulo, que o efeito líquido do cenário tributário, um diferencial que não pode ser explicado por diferenças no choque real, idêntico em todos os regimes, e que, portanto, mede diretamente o efeito do desenho institucional do financiamento.

Três implicações emergem. Primeiro, orçamento livre é referência teórica do potencial máximo, de viabilidade reduzida sob o arcabouço fiscal pós-2023. Segundo, sob restrição

efetiva o mecanismo de ajuste é mais decisivo que a política: a contrapartida via gastos preserva mais de quatro vezes o ganho obtido via taxaço. Terceiro, a via taxaço permanece negativa em todos os horizontes: o efeito-produtividade, embora positivo, é insuficiente para compensar o custo alocativo da tributação, embora por margem próxima de zero.

Esse achado dialoga com a literatura de multiplicadores fiscais no Brasil, que aponta multiplicadores tributários inferiores aos de gasto (Pires, 2014; Cavalcanti e Vereda, 2014), e com a evidência de que a composição do ajuste importa para o desempenho agregado (Alesina, Favero e Giavazzi, 2019). A contribuição aqui é mostrar que esse diferencial persiste mesmo quando o ajuste é contrapartida de uma política setorial com externalidade tecnológica positiva.

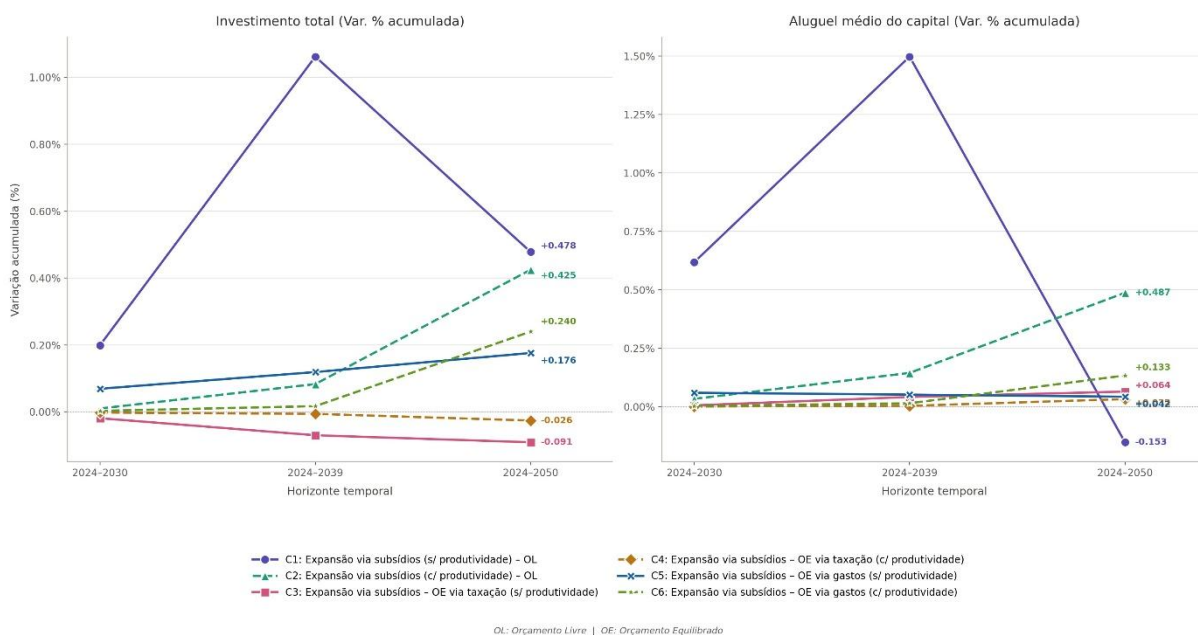
A evidência gerada pelo modelo oferece um complemento empírico a duas teses recorrentes no debate brasileiro. Por um lado, suaviza a leitura de que o crescimento recente do setor de bioinsumos teria sido impulsionado primordialmente pela força de mercado e pelas vantagens da agricultura tropical, com as políticas públicas operando mais como catalisadoras indiretas do que como motores do desempenho setorial (Rangel *et al.*, 2025): os resultados mostram que políticas bem desenhadas podem, sim, produzir efeito agregado positivo e persistente, desde que o fechamento fiscal não neutralize o estímulo. Por outro lado, impõe cautela à defesa genérica de subsídios setoriais, uma vez que a magnitude do efeito depende menos da política setorial em si do que da arquitetura fiscal que a acompanha.

Do ponto de vista normativo, o resultado mais relevante para o desenho de política é a superioridade do arranjo de equilíbrio via gastos sobre o arranjo via taxaço. Essa hierarquia sugere que a viabilização fiscal da expansão dos bioinsumos no Brasil deve ser buscada preferencialmente em realocações intraorçamentárias, por exemplo, reorientação de subsídios agrícolas já existentes para tecnologias de menor impacto ambiental, em vez de elevação da carga tributária geral ou setorial.

Analizando os resultados sobre investimento e aluguel médio do capital, tem-se que o traço mais visível da Figura 24 é a trajetória não monotônica do cenário de orçamento livre sem produtividade em ambos os painéis: o investimento salta para 1,062% em 2024–2039 antes de recuar a 0,478% em 2050, enquanto o aluguel do capital percorre caminho semelhante e torna-se negativo em 2050 (-0,153%). Esse comportamento é a manifestação esperada do ajuste dinâmico de capital em modelos EGC dinâmicos, conforme formalizado em Dixon & Rimmer (2002) para o MONASH: o estímulo fiscal via subsídios eleva o aluguel do capital inicialmente, o que atrai investimento e expande o estoque; à medida que o capital instalado cresce, sua

produtividade marginal declina e o aluguel converge para baixo, podendo cair abaixo do baseline se o estímulo não for acompanhado de ganho tecnológico.

**Figura 24 - Trajetória do investimento total e do aluguel médio do capital nos seis cenários**



Fonte: Resultados da pesquisa – Modelo BIO-BR

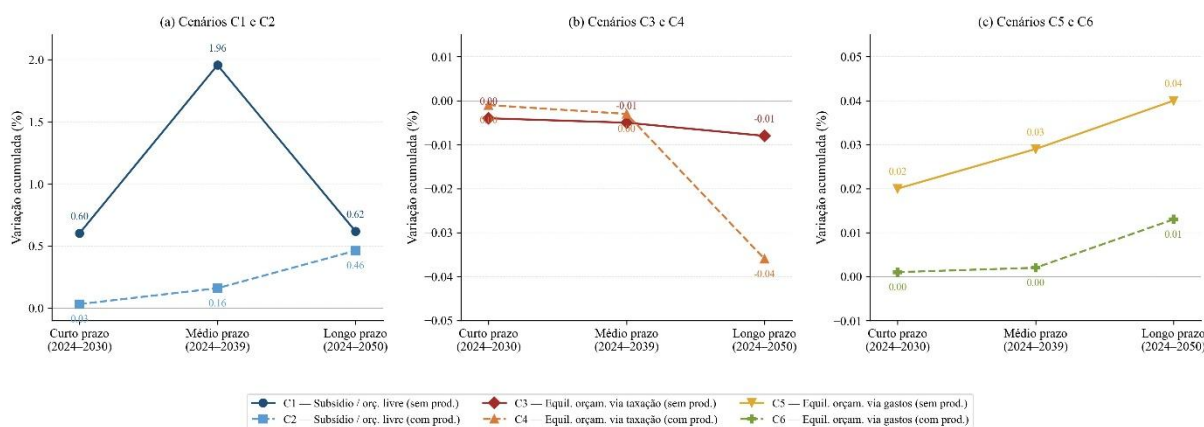
A produtividade opera como estabilizador da trajetória. Com produtividade, o investimento cresce até 0,425% em 2050 e o aluguel se mantém elevado (0,487%). A sustentabilidade dinâmica do investimento depende do componente tecnológico, não do fiscal: subsídios sem produtividade produzem pico e reversão; com produtividade, trajetória ascendente. Sob taxaço, o investimento é o único persistentemente negativo: -0,091% sem produtividade e -0,026% com produtividade em 2050. O custo alocativo da tributação supera o estímulo do subsídio (Sonaglio et al., 2010; Luporini & Alves, 2010), e o ganho tecnológico atenua, mas não reverte a contração, representando uma condição necessária, não suficiente, para neutralizar a distorção no horizonte simulado.

Os cenários via gastos invertem o padrão do orçamento livre: o investimento cresce em ambos, mas a produtividade passa a dominar (0,240% vs. 0,176% em 2050). Sob restrição efetiva, sem o estímulo fiscal puro inflando o curto prazo, o ganho tecnológico torna-se o vetor dominante de acumulação de capital. O aluguel do capital confirma a leitura: via gastos, 0,133% com produtividade contra 0,042% sem, em 2050. O padrão é análogo ao documentado por

Alesina, Favero e Giavazzi (2019), onde ajustes pelo lado do gasto preservam melhor a formação de capital do que ajustes pela receita.

A análise dos efeitos sobre o bem-estar das famílias apoia-se em duas variáveis: a renda disponível e o consumo real. A primeira capta a capacidade de gasto apropriada pelo setor privado; a segunda, sua tradução em demanda final condicionada pelos preços relativos endógenos (Burfisher, 2021; Lofgren, Harris e Robinson, 2002). A variação da renda disponível (Figura 25) revela que a regra de fechamento fiscal determina o êxito da política, sobrepondo-se aos ganhos de produtividade.

**Figura 25 - Variação acumulada (%) da renda disponível nos seis cenários**



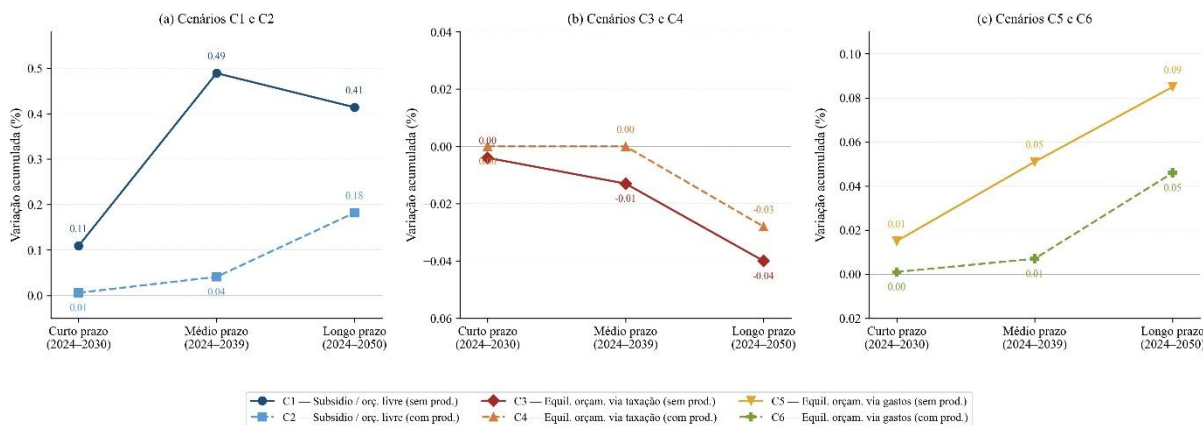
Fonte: Resultados da pesquisa – Modelo BIO-BR

Sob orçamento livre, o efeito líquido    o mais expressivo com pico de 2,12% no médio prazo e acomodac  o a 1,08% no longo, compatível com a literatura de multiplicadores fiscais em expansão líquida do gasto (Blanchard; Perotti, 2002; Orair; Siqueira; Gobetti, 2016). O cenário sem produtividade supera o com produtividade, sinal de que o canal dominante    a demanda agregada, enquanto a difusão tecnológica opera mais gradualmente. Via taxaço, o efeito líquido    pequeno e negativo, deteriorando-se de  $-0,005\%$  para  $-0,05\%$  do curto ao longo prazo: o custo distorcivo da tributa  o supera, de modo crescente, o benefício do subsídio (Auerbach, 1985; Barro, 1990). Já via gastos, o efeito líquido    modesto mas ascendente e fiscalmente sustentável ( $0,02\%$  para  $0,05\%$ ), acumulando-se sem comprometer o equilíbrio orçamentário, sinal de que a fonte de financiamento importa tanto quanto o próprio subsídio (Haavelmo, 1945; Devarajan; Swaroop; Zou, 1996).

A varia  o do consumo real (Figura 26) reproduz o padrão da renda disponível: orçamento livre com os maiores efeitos (líquido de  $0,12\%$  para  $0,59\%$ ) e predomínio do canal

de demanda; taxaço com contra  o progressiva ( $-0,005\%$  para  $-0,07\%$ ); e gastos com trajetória ascendente e sustentável ( $0,01\%$  para  $0,14\%$ ). A única nuance    que, sob gastos, a progressão do consumo    mais consistente que a da renda, sugerindo que essa arquitetura opera de modo particularmente favorável sobre o bem-estar das famílias.

**Figura 26 - Varia  o acumulada (%) do consumo real das famílias nos seis cenários**

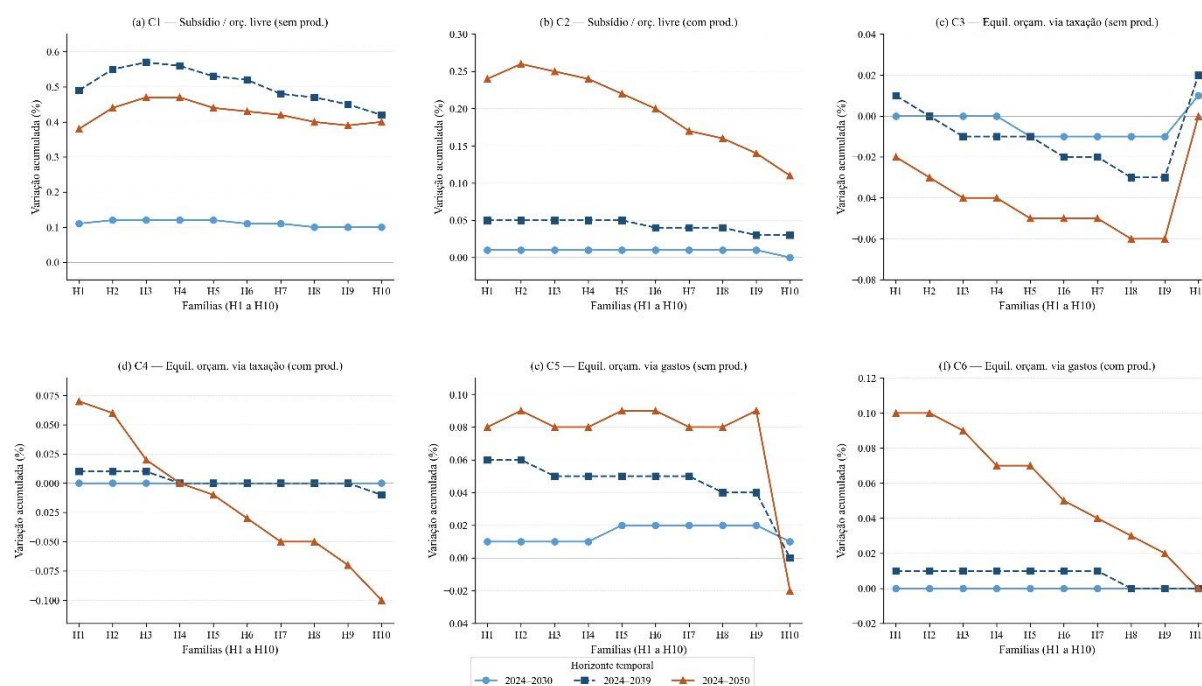


Fonte: Resultados da pesquisa – Modelo BIO-BR

A renda real por estrato (H01 a H10), na Figura 27, dá a dimensão distributiva e identifica quais grupos capturam mais benefícios em cada arquitetura. Antes de comparar os painéis, convém explicitar o canal pelo qual a expansão dos bioinsumos alcança o bem-estar. Como a demanda das famílias    modelada por um sistema linear de gastos (função Klein-Rubin), o consumo divide-se em parcela de subsistência e parcela supranumerária, e a renda real de cada estrato responde    varia  o dos preços de sua cesta. O ganho de produtividade da terra reduz os custos primários dos setores agropecuários e agroindustriais, baixando os preços dos alimentos e ampliando o poder de compra. Como os estratos de menor renda destinam mais orçamento    alimenta  o (Lei de Engel), a redu  o do preço dos alimentos opera como mecanismo redistributivo.    esse canal de preços, e não só a demanda agregada, que determina o perfil distributivo de cada arquitetura.

O orçamento livre sem produtividade (a) tem a configura  o mais expressiva, mas concentrada: os estratos intermediários (H03–H06) capturam a maior parcela dos ganhos (pico de  $0,57\%$  em H03), enquanto os extremos (H01 e H10) ganham menos, com padrão consistente com o perfil de consumo dos estratos médios como vetor privilegiado de expansões fiscais não compensadas (Goulder *et al.*, 2019).

**Figura 27 - Renda real acumulada (Var.%) entre os seis cenários de política por tipo de família, por horizonte temporal**



Fonte: Resultados da pesquisa – Modelo BIO-BR

O painel (b), referente ao cenário de orçamento livre com produtividade, replica o padrão do cenário sem produtividade em escala reduzida, com o ganho máximo no longo prazo restrito a 0,26% (H02), evidenciando que a incorporação dos ganhos de produtividade não amplifica os benefícios distributivos no horizonte simulado quando combinada à arquitetura de orçamento livre. Tal achado é coerente com a literatura específica sobre efeitos de longo prazo de subsídios a insumos agropecuários, que identifica defasagens temporais expressivas entre a introdução da política e a materialização plena dos ganhos de produtividade no bem-estar das famílias (Tetenyi e Mazur, 2024).

Os painéis (c) e (d), correspondentes aos cenários de orçamento equilibrado via taxaço, apresentam o resultado mais regressivo entre as três arquiteturas analisadas. No cenário sem produtividade, a maioria dos estratos sofre perda de renda real ao longo do horizonte simulado, com deterioração progressiva que atinge -0,06% nos estratos H08 e H09 no longo prazo, ao passo que o estrato H10 apresenta resultado nulo ou levemente positivo no longo prazo (0,00%). No cenário com produtividade, o estrato H01 alcança 0,07% no longo prazo, ao passo que o estrato H10 apresenta a perda mais expressiva (-0,10%), configurando aparente progressividade. A constatação de que o financiamento via taxaço produz perdas reais para a

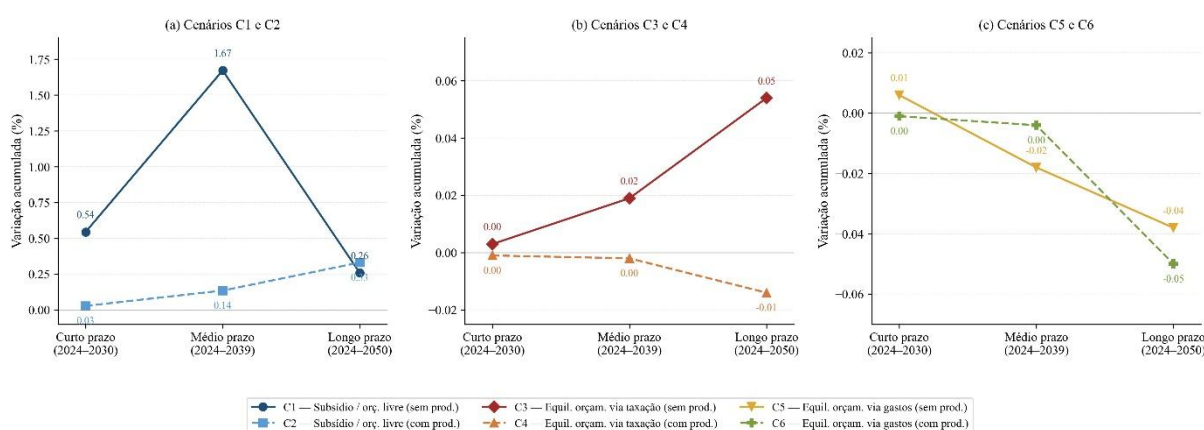
maior parte da distribuição contraria a intuição inicial de que essa modalidade poderia ser progressiva, e reforça a tese, recorrente na literatura sobre subsídios agropecuários em contextos de restrição fiscal (Wang *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2022), de que o desenho do mecanismo de financiamento pode comprometer os ganhos distributivos pretendidos.

Os painéis (e) e (f), referentes aos cenários da arquitetura de equilíbrio orçamentário via realocação de gastos, apresentam o desempenho distributivo mais interessante entre as três arquiteturas. No cenário sem produtividade, todos os estratos exceto H10 registram ganhos positivos e relativamente homogêneos no longo prazo, oscilando entre 0,08% e 0,09%, com leve deterioração restrita ao estrato H10 (-0,02%). No cenário com produtividade, observa-se padrão progressivo: os estratos inferiores (H01 e H02) atingem 0,10% no longo prazo, ao passo que os ganhos decrescem gradualmente conforme se avança na distribuição, alcançando 0,00% no estrato H10. Esse padrão é particularmente relevante do ponto de vista da formulação de política pública, pois revela que a combinação entre realocação de gastos e ganhos de produtividade dos bioinsumos é a única arquitetura simulada capaz de gerar efeitos progressivos consistentes sobre a distribuição de renda real, achado coerente com a literatura sobre subsídios direcionados e bem-estar de pequenos produtores e famílias de baixa renda (Khonje *et al.*, 2021; Tang *et al.*, 2025), bem como com os resultados que identificam ganhos de bem-estar concentrados nos estratos inferiores quando a política é estruturada sob restrição fiscal e direcionamento adequado dos recursos (Faehn *et al.*, 2020).

A leitura conjunta dos seis painéis sustenta proposições analíticas para a compreensão dos efeitos distributivos da política de fomento aos bioinsumos. Verifica-se que a arquitetura de orçamento livre, embora produza os maiores ganhos absolutos sobre a renda real das famílias, distribui esses ganhos de modo concentrado nos estratos intermediários. A arquitetura de equilíbrio orçamentário via taxaço, além de produzir efeitos predominantemente negativos sobre o conjunto da distribuição, configura padrão regressivo encoberto pela aparente progressividade do estrato superior, achado que reforça as ressalvas presentes na literatura recente sobre os limites distributivos de instrumentos tributários como mecanismo de financiamento de políticas setoriais (Cardoso, 2025). Já a arquitetura de realocação de gastos, em particular quando combinada aos ganhos de produtividade dos bioinsumos, revela-se a única alternativa capaz de produzir efeitos progressivos consistentes, beneficiando os estratos inferiores da distribuição, coerente com a literatura sobre transferências direcionadas e ganhos de bem-estar para famílias vulneráveis em contextos de transição agrícola sustentável (Tang *et al.*, 2025; Tetenyi e Mazur, 2024).

A análise dos efeitos distributivos apoiou-se no canal de preços da cesta de consumo, segundo o qual a queda do custo dos alimentos amplia a renda real das famílias mais vulneráveis. Convém agora examinar como a política afeta o nível geral de preços da economia, dimensão que qualifica aquela leitura e introduz cautela analítica adicional. Trata-se de planos distintos: enquanto o canal distributivo opera sobre o preço relativo dos alimentos, a análise a seguir avalia o índice agregado de preços e, com ele, a estabilidade nominal da economia. A distinção é relevante porque, diferentemente das variáveis de renda disponível e consumo real, em que o sinal positivo é desejável, a elevação do índice de preços é indesejada, pois pressões inflacionárias podem corroer os ganhos reais identificados nas variáveis precedentes. A variação acumulada do índice de preços nos seis cenários é apresentada na Figura 28.

**Figura 28 - Variação acumulada (%) do índice de preços nos seis cenários**



Fonte: Resultados da pesquisa – Modelo BIO-BR

O orçamento livre concentra a maior pressão inflacionária, com efeito líquido em pico de 1,81% no médio prazo antes de acomodar a 0,54%, padrão típico de expansão fiscal não compensada, em que a injeção de recursos pressiona a demanda acima da capacidade produtiva (Sargent e Wallace, 1981; Leeper, 1991). O ponto relevante é que essa inflação de médio prazo (1,81%) é da mesma ordem da expansão de renda disponível (2,12%): parte expressiva do impulso fiscal dissipa-se pelos preços, comprometendo a sustentabilidade real dos maiores ganhos nominais identificados nessa arquitetura.

Via taxaço, a pressão é modesta, mas persistente (líquido de 0,04% no longo prazo), e os dois cenários divergem em sinal: com produtividade o índice torna-se negativo. O ganho tecnológico atua, assim, como mecanismo de contenção de preços, consistente com a leitura

distributiva anterior, sendo que a produtividade preserva o poder de compra dos estratos inferiores justamente por baratear bens essenciais.

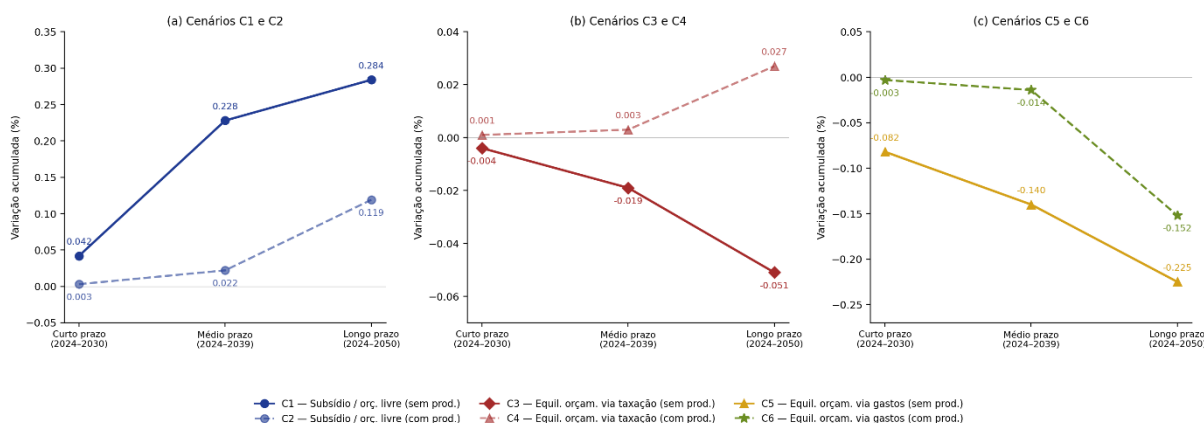
A via gastos é a mais virtuosa também aqui: o efeito líquido é deflacionário e progressivo (de 0,01% a -0,09% no longo prazo). Sem pressão líquida sobre a demanda e com ganhos graduais de produtividade, o nível de preços cai (Galí, 1999), trajetória que reforça o perfil progressivo da renda real, já que o barateamento da cesta beneficia preferencialmente as famílias de menor renda.

O perfil deflacionário e progressivo da arquitetura de realocação de gastos tem uma implicação que merece registro, pois recai sobre a posição das famílias de menor renda enquanto compradoras líquidas de alimentos. Para esses estratos, o acesso ao alimento depende menos da renda nominal do que do preço da cesta de subsistência, de modo que a queda de preços observada nessa arquitetura atua diretamente sobre a dimensão de acesso econômico da segurança alimentar (FAO, 2005). O canal é o mesmo identificado por Ivanic e Martin (2008) e por De Hoyos e Medvedev (2011): como os domicílios mais pobres destinam metade ou mais do orçamento à alimentação, variações no preço dos alimentos transmitem-se de forma amplificada ao seu bem-estar real. A particularidade do mecanismo aqui simulado é que essa queda de preços não decorre de transferência de renda nem de controle administrativo, mas do próprio deslocamento da fronteira de produção via ganho de produtividade dos bioinsumos o que a torna, a um só tempo, fiscalmente sustentável e não inflacionária, diferentemente das políticas de sustentação de preços que historicamente oneram o consumidor de baixa renda.

Esse efeito favorável encontra paralelo na literatura internacional que emprega modelos de EGC para avaliar políticas agrícolas em economias em desenvolvimento. Kinkpe *et al.* (2024), em modelo EGC calibrado para o Benin, encontram efeitos pró-pobres do desenvolvimento da cadeia agroalimentar, com ganhos concentrados nos domicílios de baixa renda; e Dong (2026), combinando EGC e microssimulação para a China rural, demonstra que subsídios bem direcionados produzem os maiores ganhos de bem-estar justamente para os grupos vulneráveis, reforçando que o desenho do instrumento determina o perfil distributivo. O ponto que interessa reter, e que reconduz a discussão ao objeto da Tese, é que o vetor desses ganhos não é o subsídio em si, mas o ganho de produtividade que ele viabiliza: é o barateamento do alimento por aumento de eficiência produtiva (e não por dispêndio fiscal) que beneficia simultaneamente o consumidor pobre e a sustentabilidade das contas públicas (Hertel, 1997; FAO, 2005), padrão reproduzido pela arquitetura de realocação de gastos com produtividade aqui simulada.

O consumo do governo (Figura 29) segue diretamente o mecanismo de cada regime: cresce sob orçamento livre, contrai-se de forma modesta e persistente sob taxaço, e registra a maior queda sob a via gastos onde, por construção, o subsídio é financiado pela contração direta do gasto público (Buiter, 1977; Aschauer, 1989).

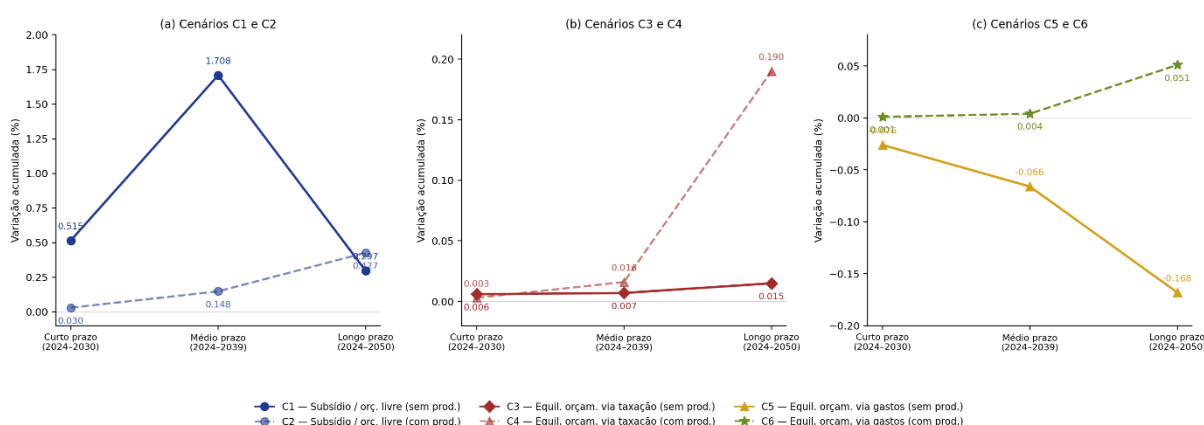
**Figura 29 - Variação acumulada (%) do consumo do governo nos seis cenários**



Fonte: Resultados da pesquisa – Modelo BIO-BR

A renda do governo (Figura 30) acompanha, sob orçamento livre, o mesmo ciclo de pico intermediário e acomodação das demais variáveis dessa arquitetura.

**Figura 30 - Variação acumulada (%) da renda do governo nos seis cenários**



Fonte: Resultados da pesquisa – Modelo BIO-BR.

Considerando os subsídios via taxaço, ambos os cenários são positivos, mas a produtividade muda a escala, sendo que o efeito líquido salta para 0,205% no longo prazo. A

combinação entre compensação tributária e ganhos de produtividade amplia substancialmente a base arrecadatória, coerente com os efeitos dinâmicos da tributação sobre bases produtivas em expansão (Mendoza; Razin; Tesar, 1994). Os cenários via gastos divergem em sinal: sem produtividade a renda do governo deteriora-se até  $-0,168\%$ , com produtividade mantém-se positiva ( $0,051\%$ ). O efeito líquido é negativo ( $-0,117\%$  no longo prazo), pois a contração do gasto reduz a base arrecadatória, ainda que a produtividade mitigue parcialmente essa queda.

A leitura conjunta revela um *trade-off* central de que as arquiteturas de maiores ganhos de renda governamental são as que mais oneram o equilíbrio fiscal global. A via taxaço é a única que combina expansão da renda governamental e equilíbrio por construção, mas à custa das variáveis reais; a via gastos preserva a sustentabilidade e o bem-estar das famílias, mas ao custo de contrair outras destinações do gasto público.

A utilidade por estrato (Figura 31) é a medida de bem-estar mais sintética, pois a utilidade incorpora simultaneamente consumo, preços e preferências (Cockburn *et al.*, 2008; Faehn *et al.*, 2020). Confrontá-la com a renda real revela onde os ganhos materiais se traduzem (ou não) em bem-estar (o ponto onde a leitura por utilidade acrescenta informação à da renda nominal).

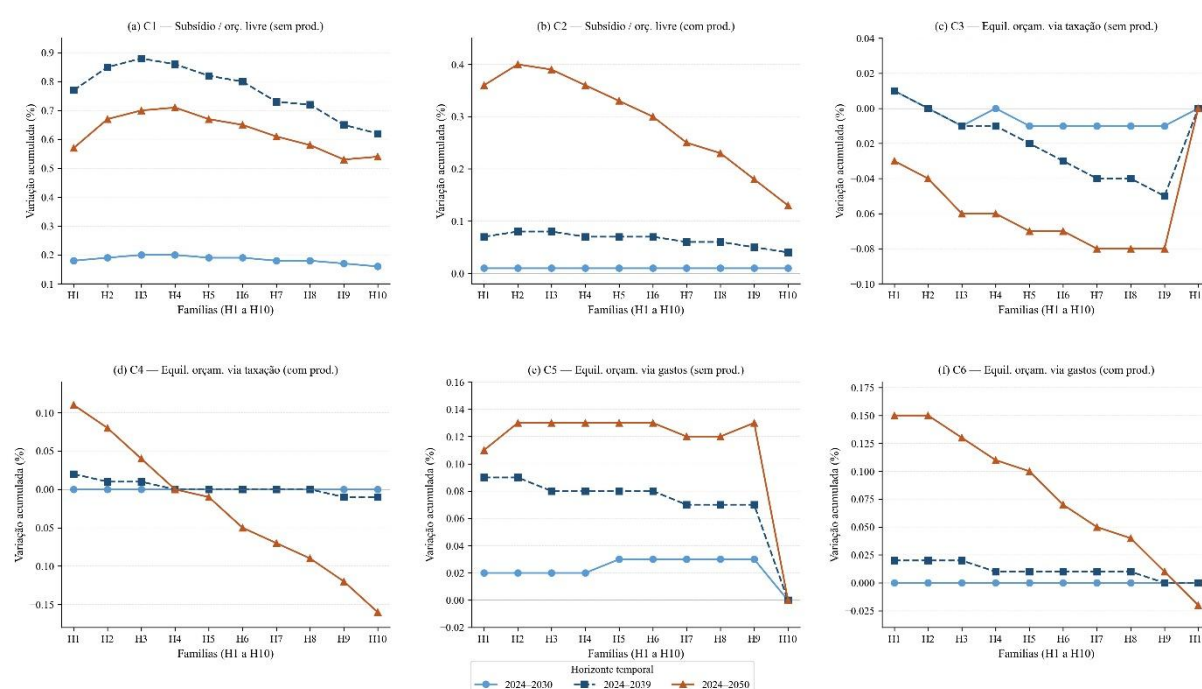
Sob orçamento livre, o padrão da renda real se repete com ganhos máximos concentrados nos estratos intermediários, decrescentes nos extremos, e em escala reduzida quando há produtividade (máximo de  $0,40\%$  em H02). Mesmo quando a renda nominal é homogênea entre estratos, os ganhos de utilidade não são, ou seja, a produtividade modifica o perfil distributivo do bem-estar ainda que os ganhos nominais sejam uniformes, em linha com Tetenyi e Mazur (2024) sobre canais distributivos da difusão tecnológica. Via taxaço, o padrão regressivo é o mais acentuado de todos os cenários. Sem produtividade, há perdas generalizadas (até  $-0,08\%$  em H07–H09). Com produtividade, surge a mesma progressividade aparente já vista na renda real, porém mais extrema (H01  $+0,11\%$ , H10  $-0,16\%$ ): não decorre de ganho real dos inferiores, mas da deterioração dos superiores sob a incidência tributária. A constatação reforça as ressalvas sobre os limites distributivos do financiamento via tributação (Cardoso, 2025; Tang *et al.*, 2025).

O desempenho via gastos é o mais virtuoso. Sem produtividade, ganhos homogêneos para H01–H09 ( $0,11\text{--}0,13\%$ ) e H10 neutro; aqui a utilidade diverge da renda nominal (que se concentrava no topo), sinal de que a desinflação característica dessa arquitetura redistribui bem-estar para fora do topo (Khonje *et al.*, 2021). Com produtividade, surge a progressividade mais nítida de todos os cenários (H01–H02  $+0,15\%$ , decrescendo a  $-0,02\%$  em H10): a única

arquitetura capaz de concentrar bem-estar nos estratos inferiores, aproximando-se do ideal redistributivo de políticas de transição agroecológica (Tang *et al.*, 2025; Tetenyi e Mazur, 2024).

O quadro de utilidade confirma o da renda real e autoriza a proposição normativa central que quando combinada aos ganhos de produtividade, a realocação de gastos permite que a política opere simultaneamente como instrumento de transição agroecológica, sustentabilidade fiscal e equidade distributiva (Faehn *et al.*, 2020; Cardoso, 2025; Tang *et al.*, 2025).

**Figura 31 - Trajetória temporal (Var.%) da utilidade por família e por cenário**



Fonte: Resultados da pesquisa – Modelo BIO-BR

O painel (b), referente ao cenário de orçamento livre com produtividade, replica o padrão observado no cenário sem produtividade, em escala reduzida, com ganhos máximos no longo prazo restritos a 0,40% no estrato H02 e configuração mais nitidamente decrescente conforme se avança da base para o topo da distribuição. A homogeneidade observada na renda nominal do cenário com produtividade contrasta, portanto, com a heterogeneidade dos ganhos de utilidade, evidenciando que a incorporação dos ganhos de produtividade modifica o perfil distributivo do bem-estar mesmo quando os ganhos nominais são uniformes, que vai de encontro com a teoria de Tetenyi e Mazur, 2024 que desenvolveu sua obra sobre canais distributivos de difusão tecnológica em modelos de equilíbrio parcial.

O painel (c), referente ao cenário subsídios via taxaço sem produtividade, apresenta perdas de utilidade generalizadas para a maior parte dos estratos no longo prazo, com deteriora  o progressiva que atinge -0,08% nos estratos H07, H08 e H09. O estrato H10 destaca-se por apresentar resultado neutro (0,00%), ao passo que o estrato H01 também registra leve resultado positivo no curto e médio prazos antes de deteriorar-se para -0,03% no longo prazo. Tal padrão evidencia caráter regressivo da política sob essa arquitetura no que concerne    utilidade: o financiamento via taxaço onera o bem-estar dos estratos intermediários e médio-altos, ao passo que preserva relativamente o bem-estar dos estratos extremos.

O painel (d), referente ao cenário subsídios via taxaço com produtividade, evidencia o padrão regressivo mais acentuado entre todos os cenários analisados. No longo prazo, o estrato H01 registra ganho de 0,11%, ao passo que os ganhos decrescem progressivamente conforme se avança na distribui  o, atingindo -0,16% no estrato H10. Cabe destacar, contudo, que essa progressividade aparente não decorre de ganho generalizado de bem-estar nos estratos inferiores, mas da combina  o entre leve recupera  o desses estratos via ganhos de produtividade e deteriora  o expressiva dos estratos superiores em razão da incidência tributária. A constata  o reforça as ressalvas presentes na literatura recente sobre os limites distributivos do financiamento de políticas setoriais via tributa  o adicional, particularmente em contextos nos quais o   nus fiscal incide de modo desigual sobre as fontes de renda e os padrões de consumo dos diferentes estratos (Cardoso, 2025; Tang *et al.*, 2025).

O painel (e), referente ao cenário de subsídios via gastos sem produtividade, apresenta padrão claramente virtuoso de bem-estar, com ganhos de utilidade positivos e relativamente homogêneos entre os estratos H01 a H09, oscilando no longo prazo entre 0,11% e 0,13%. O estrato H10, contudo, apresenta resultado neutro (0,00%) em todos os horizontes, configurando padrão que beneficia preferencialmente os nove primeiros estratos da distribui  o. Essa configura  o contrasta com o padrão observado na renda nominal do mesmo cenário, em que os ganhos eram concentrados no estrato superior, sugerindo que o canal de preços (particularmente a desinfla  o progressiva característica dessa arquitetura) opera no sentido de redistribuir o bem-estar em favor dos estratos não pertencentes ao topo da distribui  o (Khonje *et al.*, 2021).

O painel (f), referente ao cenário subsídios via gastos com produtividade, evidencia o padrão progressivo mais nítido entre todos os cenários simulados. No longo prazo, os estratos H01 e H02 registram ganhos de 0,15%, ao passo que os ganhos decrescem progressivamente conforme se avança na distribui  o, atingindo -0,02% no estrato H10. Tal configura  o revela

que a combinação entre realocação de gastos e ganhos de produtividade dos bioinsumos é a única arquitetura simulada capaz de gerar ganhos de bem-estar concentrados nos estratos inferiores da distribuição, com leve perda restrita ao estrato superior, padrão que se aproxima do ideal redistributivo perseguido por políticas voltadas à transição agroecológica e ao bem-estar de famílias vulneráveis (Tang *et al.*, 2025; Tetenyi e Mazur, 2024).

A leitura conjunta dos seis painéis sustenta proposições analíticas que consolidam o quadro distributivo da política de fomento aos bioinsumos. A arquitetura de orçamento livre produz os maiores ganhos absolutos de utilidade, mas distribui esses ganhos de modo concentrado nos estratos intermediários, configurando padrão neutro do ponto de vista da equidade distributiva. A arquitetura de equilíbrio orçamentário via taxaço produz perdas generalizadas de utilidade, com padrão regressivo encoberto por aparente progressividade, achado que reforça a inadequação dessa modalidade de financiamento sob a perspectiva do bem-estar das famílias. A arquitetura de realocação de gastos, por fim, evidencia comportamento crescentemente progressivo conforme se avança de cenários sem produtividade para com produtividade, configurando-se como a única arquitetura simulada capaz de produzir ganhos de bem-estar consistentemente concentrados nos estratos inferiores da distribuição quando os ganhos de produtividade dos bioinsumos são incorporados. O desenho institucional adequado da política de fomento aos bioinsumos pode operar simultaneamente como instrumento de transição agroecológica, sustentabilidade fiscal e promoção da equidade distributiva, em consonância com a literatura recente sobre integração entre políticas setoriais, bem-estar e transformação produtiva sustentável (Faehn *et al.*, 2020; Cardoso, 2025; Tang *et al.*, 2025).

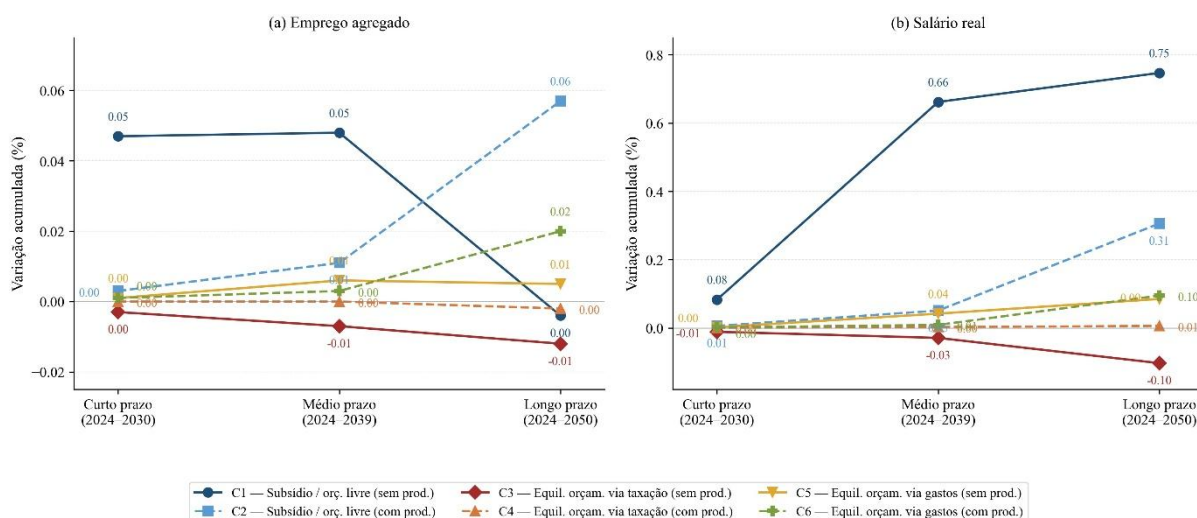
A análise do emprego e do salário real (Figura 32) aponta para o padrão esperado em modelos EGC: os ajustes ocorrem majoritariamente via preços (salários), não via quantidades (emprego), dada a oferta de trabalho inelástica no curto e médio prazos (Burfisher, 2021; Dixon e Rimmer, 2002).

No emprego, o orçamento livre é positivo e relativamente estável (o esmaecimento do estímulo fiscal é compensado pela maturação da produtividade); a taxaço contrai progressivamente, coerente com seus efeitos adversos sobre o trabalho (Daveri; Tabellini, 2000; Prescott, 2004); e a via gastos é a única ascendente e sustentável, com a produtividade ampliando a criação de postos (0,020% no longo prazo).

O salário real confirma o canal de ajuste por preço: sob orçamento livre, registra a maior magnitude entre todas as variáveis do mercado de trabalho, ou seja, emprego cresce pouco,

salário sobe muito (Galí; López-Salido; Vallés, 2007). Via taxaço, o custo distorcivo incide com particular intensidade sobre a remuneração (Mendoza; Razin; Tesar, 1994), negativa sem produtividade e levemente positiva com ela. Via gastos, o salário sobe de forma consistente em ambos os cenários.

**Figura 32 - Variação acumulada (%) no emprego agregado e salário real nos seis cenários**

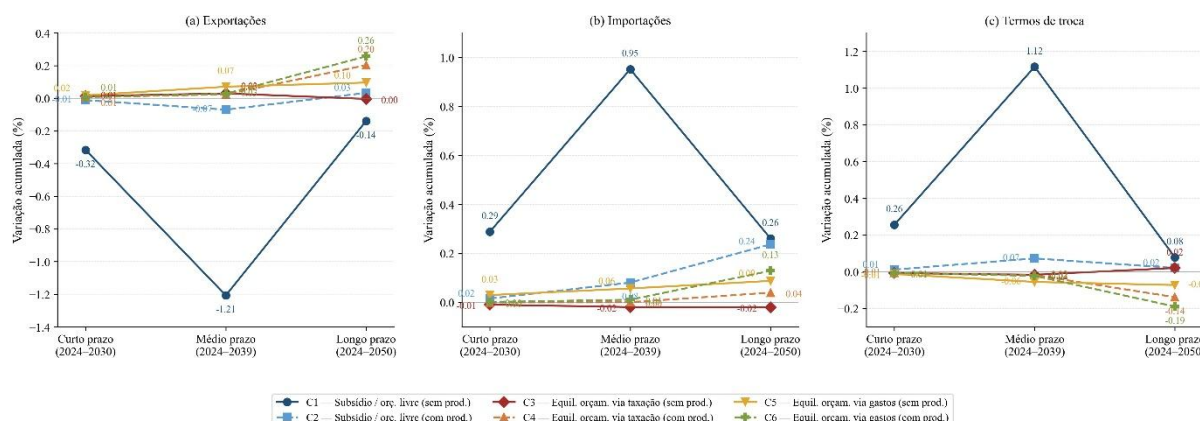


Fonte: Resultados da pesquisa – Modelo BIO-BR

O ajuste é, portanto, assimétrico: o emprego responde de forma contida e o salário real concentra a variação, sinal da rigidez de emprego no curto e médio prazos. A via gastos é novamente a única a combinar expansão sustentável de emprego e salário, enquanto a taxaço contrai ambos. A predominância do ajuste salarial sugere uma implicação de política onde ganhos do setor tendem a se concentrar na remuneração mais do que na geração de postos, o que recomenda políticas complementares de qualificação da mão de obra.

O setor externo (Figura 33) é dimensão relevante, dado o peso do agronegócio na pauta exportadora brasileira.

No painel (a), as exportações: o orçamento livre produz a contração mais expressiva (efeito líquido em vale de -1,28% no médio prazo), pelo canal cambial, onde a apreciação real do impulso fiscal compromete a competitividade (Dornbusch, 1980; Obstfeld; Rogoff, 1995). Em contraste, os arranjos de orçamento equilibrado são positivos, e a via gastos é a mais virtuosa com os ganhos de produtividade, sem pressão sobre a demanda, ampliam a competitividade externa.

**Figura 33 - Variação acumulada (%) nas Exportações, importações e termos de troca**

Fonte: Resultados da pesquisa – Modelo BIO-BR

No painel (b), as importações espelham as exportações com sinal invertido, com a apreciação cambial e a expansão da demanda doméstica do orçamento livre estimulam o consumo externo, enquanto a via gastos exhibe trajetória ascendente (até 0,24%) sustentada pela expansão de renda e consumo já identificada. Já no no painel (c), os termos de troca deterioram-se mais sob a via gastos com produtividade (−0,19% no longo prazo). Essa deterioração não é adversa, ela decorre do mecanismo virtuoso pelo qual a produtividade reduz custos unitários domésticos e amplia a competitividade em volume, como mostra o painel de exportações.

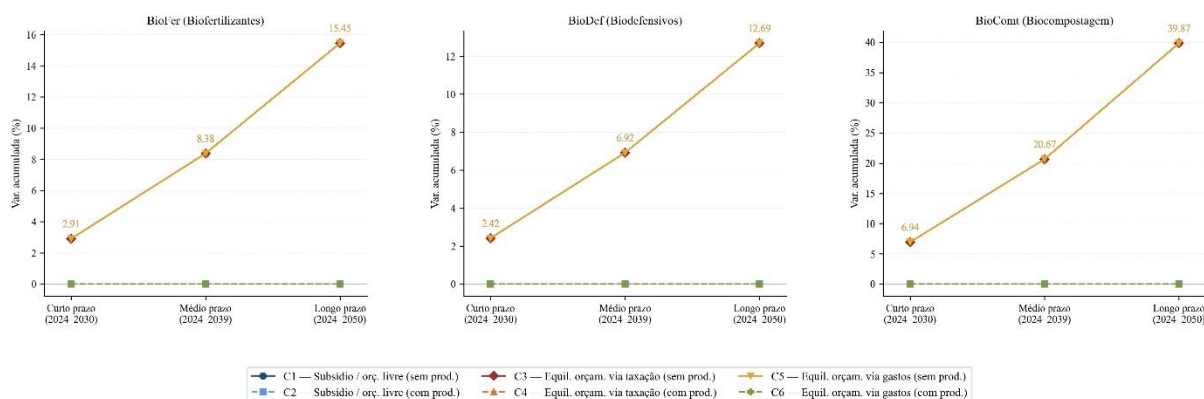
Em síntese, a expansão não compensada deteriora a posição externa por apreciação cambial, enquanto os arranjos equilibrados, sobretudo a via gastos, ampliam as exportações no longo prazo (Melitz, 2003). A piora dos termos de troca opera como transmissão virtuosa dos ganhos de produtividade, e o padrão da via gastos (exportar e importar mais sob termos de troca piores) é compatível com maior abertura e eficiência alocativa.

## 5.2 Resultados setoriais

Os resultados das simulações revelam, a magnitude da expansão dos três setores de bioinsumos quando contemplados por políticas de incentivo. Conforme ilustrado na Figura 34, a biocompostagem (BioComt) apresenta a trajetória mais vigorosa, com desvios acumulados de 6,94% no curto prazo, 20,67% no médio prazo e 39,87% no longo prazo. Os biofertilizantes (BioFer) seguem padrão semelhante, alcançando 15,45% em 2050, enquanto os biodefensivos (BioDef) atingem 12,69% no mesmo horizonte. Esse comportamento é coerente entre os cenários sem produtividade da terra, indicando que o crescimento setorial decorre diretamente

do estímulo fiscal recebido, independentemente do mecanismo de financiamento adotado (subsídio livre, equilíbrio via taxaço ou via gastos).

**Figura 34 - Desvios acumulados (Var.%) do nível de atividade (x1tot) dos setores de bioinsumos**



Fonte: Resultados da pesquisa – Modelo BIO-B

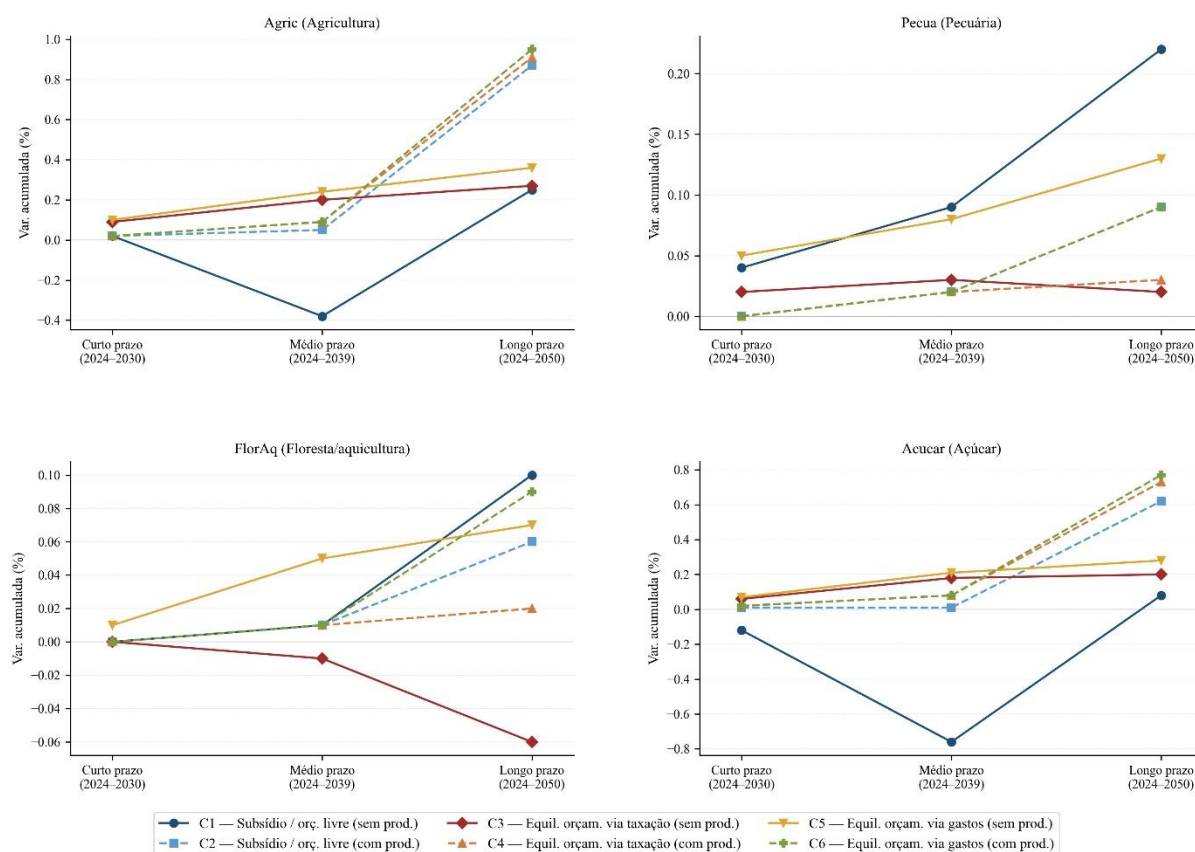
A magnitude superior da biocompostagem reflete sua maturidade tecnológica e a maior capilaridade de sua cadeia de suprimentos no Brasil, característica já apontada por Meemken e Qaim (2018), que destacam o papel dos insumos biológicos baseados em resíduos como elo entre sustentabilidade e ganhos de produtividade. Já o crescimento mais moderado dos biodefensivos é compatível com as barreiras regulatórias e de registro descritas por Parra (2014), que exigem prazos longos para difusão comercial.

A Figura 35 evidencia que os impactos não se restringem aos setores beneficiados diretamente: há transbordamentos para as cadeias agropecuárias. No cenário de orçamento livre com produtividade, a agricultura (Agric) salta de 0,02% no curto prazo para 0,87% em 2050, e o açúcar (Acucar) acompanha esse movimento com 0,62% no longo prazo. Esse padrão confirma a hipótese de que inovações em insumos intermediários, particularmente quando associadas a ganhos de produtividade, geram efeitos multiplicadores ao longo da cadeia produtiva (Aghion e Howitt, 2009).

Um achado relevante é o contraste entre os cenários. No orçamento livre sem produtividade, a agricultura sofre retração no médio prazo (-0,38%) antes de se recuperar, e o açúcar apresenta queda (-0,76%) no mesmo horizonte. Esse comportamento sugere que, sem ganhos de eficiência, o subsídio puro provoca deslocamento de fatores produtivos entre setores que competem por recursos, fenômeno bem documentado por Dixon e Rimmer (2002) na

análise de modelos EGC. Quando a produtividade é incorporada, tanto em orçamento livre quanto em equilíbrio orçamentário via taxaço ou gastos, os efeitos negativos são neutralizados e convertidos em ganhos líquidos, reforçando o argumento de que políticas de bioinsumos só são plenamente eficazes quando associadas a mecanismos de difusão tecnológica.

**Figura 35 - Trajetória do nível de atividade (Var.%) de setores relacionados à agropecuária**



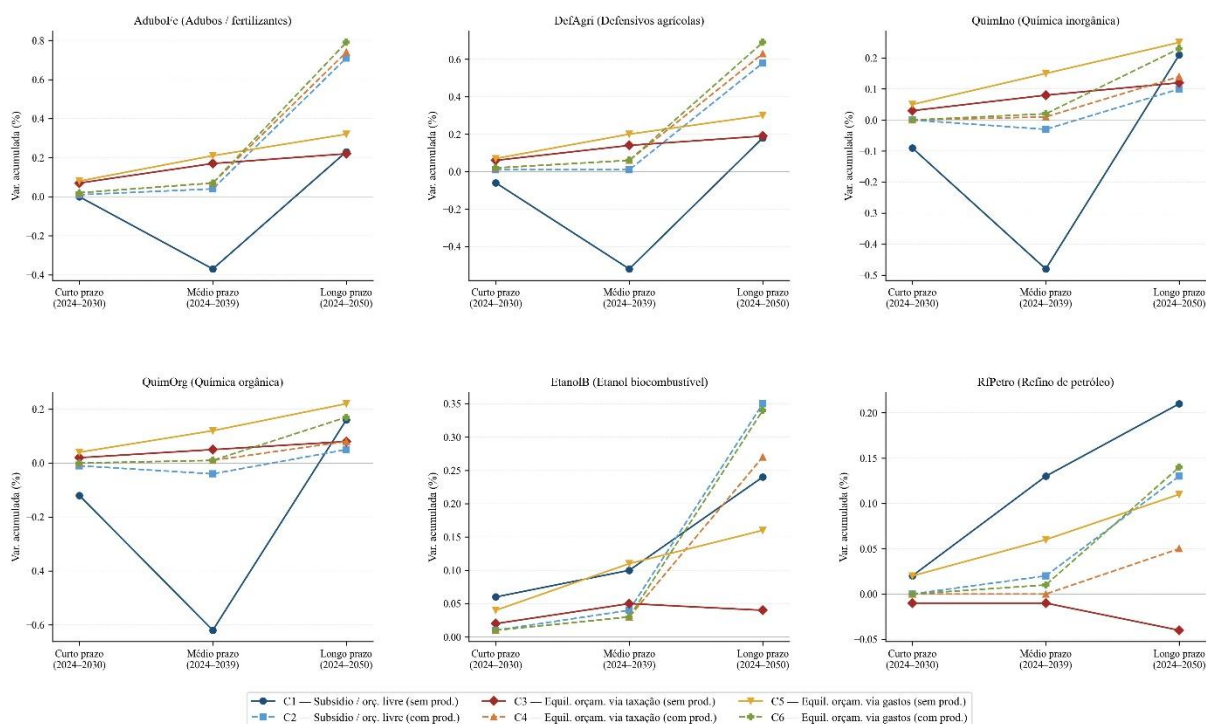
Fonte: Resultados da pesquisa – Modelo BIO-B

A pecuária (Pecu), o setor de floresta/aquicultura (FlorAq) e o setor sucroalcooleiro (Açucar) apresentam variações de menor magnitude que a agricultura, mas qualitativamente positivas, sobretudo no longo prazo. Cabe ressaltar, no entanto, um contraste qualitativo entre os setores. Enquanto pecuária e floresta/aquicultura tendem a responder de forma mais favorável nos cenários sem produtividade, o setor de açúcar evidência forte sensibilidade ao ganho de produtividade, com os cenários que o incorporam superando, no longo prazo, aqueles que simulam apenas o choque de oferta. Dessa maneira, esses resultados sugerem que os bioinsumos contribuem para a sustentabilidade da intensificação pecuária, alinhando-se à

literatura de pecuária de baixo carbono (Vidal *et al.*, 2021). Os ganhos em pecuária e floresta/aquicultura mostram-se, ainda assim, mais discretos, o que pode estar atrelado à menor intensidade de uso direto desses insumos quando comparada à agricultura e ao setor sucroalcooleiro.

A Figura 36 sugere ainda que os setores da indústria química respondem de maneira distinta ao estímulo aos bioinsumos, refletindo o duplo papel que essa cadeia desempenha, como fornecedora de insumos concorrentes (defensivos químicos, fertilizantes minerais) e como fornecedora de matérias-primas complementares (química inorgânica, refino de petróleo). Essa dualidade é central para compreender as trajetórias observadas.

**Figura 36 - Trajetória do nível de atividade (Var.%) de setores relacionados à indústria química**



Fonte: Resultados da pesquisa – Modelo BIO-BR.

Os setores de adubos/fertilizantes (AduboFe) e defensivos agrícolas (DefAgri), que poderiam ser intuitivamente vistos como "perdedores" diante da expansão dos bioinsumos, apresentam, ao contrário, trajetórias positivas no longo prazo em praticamente todos os cenários. Adubos/fertilizantes alcança 0,79% em 2050 no cenário de orçamento equilibrado com subsídios via gastos com produtividade da terra e 0,74% no cenário via taxaço com produtividade, enquanto defensivos agrícolas atinge 0,69% e 0,63%, respectivamente. Esse

resultado mostra que a substituição entre insumos químicos e biológicos é parcial e não completa, em linha com a hipótese de Khanna *et al.* (2017) sobre a coexistência tecnológica em cadeias agrícolas comerciais.

A explicação econômica é direta, pois a política de bioinsumos opera por dois canais simultâneos sobre a demanda por fertilizantes químicos. De um lado, o canal de substituição desloca parte da demanda dos químicos para os biofertilizantes, em razão da redução do preço relativo destes últimos no pacote tecnológico. De outro, o canal de escala opera no sentido oposto: ao induzir ganhos de produtividade da terra, a política expande a atividade agrícola agregada e, por consequência, eleva a demanda por todos os insumos vinculados à produção, inclusive os químicos. O resultado líquido depende da magnitude relativa entre os dois canais. Nas simulações realizadas, o canal de escala domina o canal de substituição, de modo que os fornecedores de fertilizantes químicos se beneficiam, em termos absolutos, da expansão induzida pela política de bioinsumos, ainda que percam participação relativa no mercado total de insumos. Esse padrão é coerente com o argumento de Just e Hueth (1979), segundo o qual o ganho de produtividade em um setor agrícola pode beneficiar fornecedores de insumos a montante quando a expansão da atividade compradora compensa o deslocamento do insumo na função de produção.

Cabe destacar, entretanto, o comportamento do cenário de orçamento livre sem produtividade, no qual ambos os setores registram quedas pronunciadas no médio prazo (-0,37% em AduboFe e -0,52% em DefAgri). Sem ganhos de produtividade que ampliem o bolo, o subsídio puro provoca substituição direta, antes que o efeito-escala se consolide no longo prazo. Esse é um achado relevante pois a literatura de bioeconomia (Bracco *et al.*, 2018) tende a tratar a substituição química-biológica como linear, mas os resultados mostram que sua dinâmica depende crucialmente do mecanismo de difusão tecnológica.

A química inorgânica (QuimIno) apresenta crescimento no longo prazo (0,25% no cenário de subsídios via gastos sem produtividade e 0,23% no mesmo cenário com produtividade), refletindo seu papel como fornecedora de insumos básicos para a produção tanto de fertilizantes minerais quanto, em certa medida, dos próprios bioinsumos, especialmente no processamento de matérias-primas para biofertilizantes e formulações de biodefensivos. Esse efeito de complementaridade indireta é compatível com a estrutura insumo-produto da química nacional, conforme caracterizada por Ferreira Filho e Horridge (2014).

Já a química orgânica (QuimOrg) apresenta trajetória mais modesta, com 0,22% no cenário subsídios via gastos sem produtividade e 0,17% no cenário com produtividade no longo

prazo, mas exhibe a queda mais acentuada no cenário de orçamento livre sem produtividade (-0,62% no médio prazo). O setor de etanol biocombustível (EtanolB) apresenta um dos resultados mais expressivos, alcançando 0,35% no cenário de subsídios via gastos com produtividade e 0,34% no cenário de subsídios via taxaço com produtividade no longo prazo. Esse desempenho é intermediado pelo setor de açúcar, fortemente beneficiado pela expansão dos bioinsumos, evidenciando o encadeamento sucroenergético. Como demonstram Cavalcanti e Magalhães (2017), choques positivos sobre a cana-de-açúcar reverberam ao longo de toda a cadeia, do plantio à bioenergia. Vale notar que, mesmo no cenário mais restritivo (via taxaço sem produtividade), o etanol mantém variação positiva, sinalizando robustez do encadeamento independentemente do mecanismo de financiamento da política.

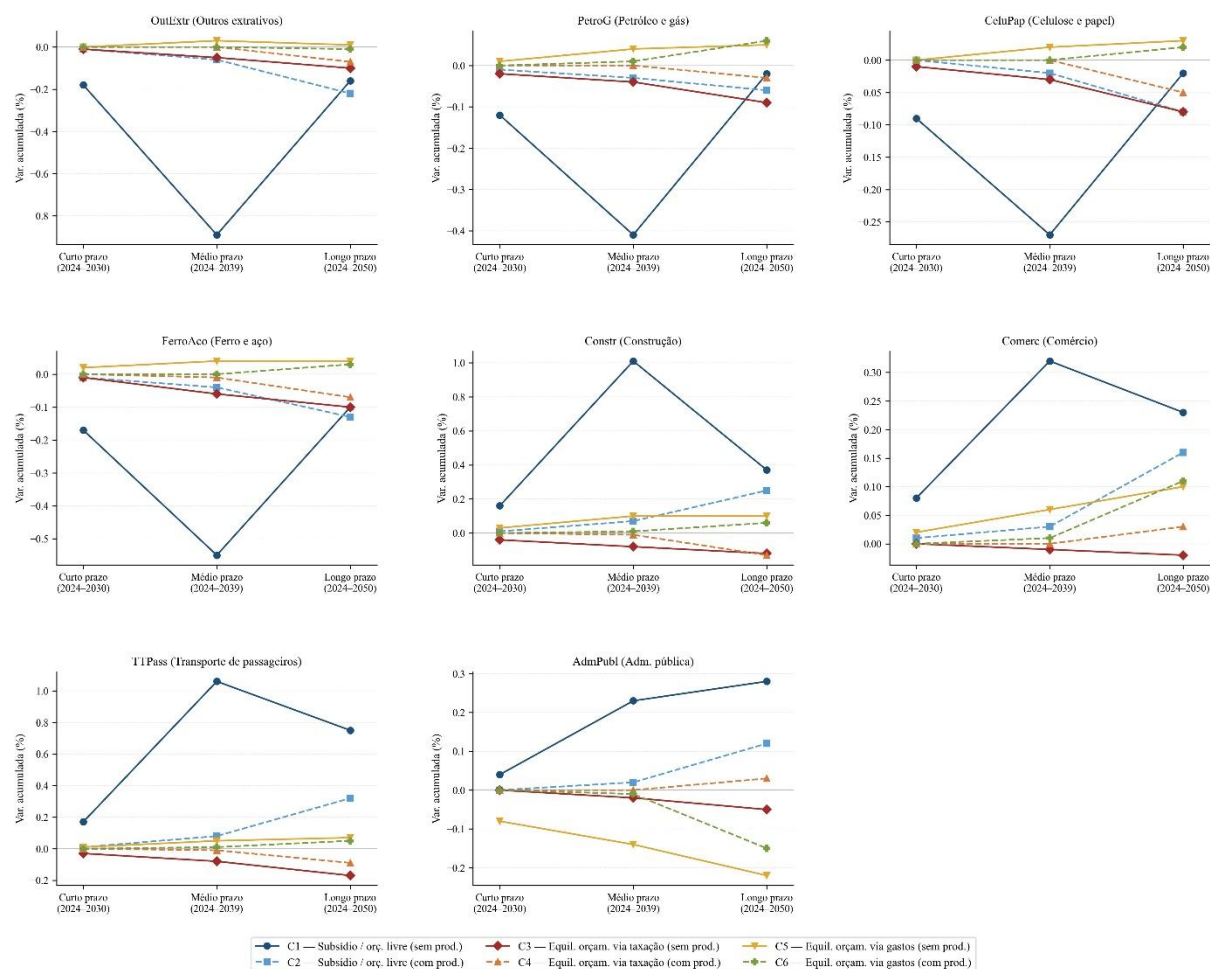
O refino de petróleo (RfPetro) apresenta o comportamento mais singular do conjunto: é o único setor em que o cenário de orçamento livre gera os maiores ganhos (0,21% no longo prazo), enquanto produz resultado negativo (-0,05%). Essa inversão reflete a sensibilidade do setor à dinâmica fiscal: quando o subsídio é financiado livremente, há expansão da demanda agregada que se transmite ao refino via consumo de derivados; quando o financiamento ocorre via taxaço, o efeito-renda negativo sobre a economia compromete a demanda por combustíveis fósseis.

A Figura 37 apresenta os resultados de setores relacionados à indústria química e permitem identificar três grupos analiticamente distintos. O primeiro reúne setores extrativos e da indústria pesada (Outras indústrias extrativistas, Petróleo e gás, Celulose e papel, Ferro e Aço), penalizados pela realocação de fatores no curto e médio prazo, com recuperação dependente da presença de produtividade endógena.

O segundo agrupa setores fiscalmente dependentes (Construção e Administração Pública), beneficiados quando o subsídio é livre e prejudicados quando o financiamento ocorre via gastos (sem produtividade). O terceiro engloba setores de serviços ligados à demanda final (Transporte de passageiros e comércio), que prosperam consistentemente como reflexo do efeito-renda gerado pela política.

A Tabela 7 apresenta a variação acumulada (%) da produção por agregado setorial, considerando os seis cenários de política de subsídio aos bioinsumos. Os resultados oferecem uma visão consolidada dos efeitos sistêmicos da política, permitindo identificar quais grandes blocos da economia brasileira são mobilizados pelas políticas e quais permanecem relativamente neutros ou pressionados pelo ajuste alocativo.

**Figura 37 - Trajetória do nível de atividade (Var.%) de setores relacionados à setores indiretos, por período**



O agregado de fertilizantes apresenta a resposta mais robusta entre os blocos diretamente afetados, com variação acumulada de 0,75% no longo prazo do cenário via gastos e desempenho similar nos demais cenários com produtividade endógena (0,67% no orçamento livre e 0,70% no cenário via taxas). Esse comportamento confirma a hipótese de coexistência tecnológica entre fertilizantes químicos e biofertilizantes na cadeia agrícola brasileira, em que a substituição parcial entre os insumos é compensada pela expansão do mercado total induzida pelos ganhos de produtividade na lavoura (Hungria *et al.*, 2013; Santos *et al.*, 2023). A literatura de bioeconomia tem destacado que a difusão dos biofertilizantes no Brasil ocorre majoritariamente por meio de combinações com adubos minerais, especialmente em sistemas de manejo integrado, o que explica por que o agregado fertilizantes responde positivamente à

política mesmo enfrentando concorrência direta dos biofertilizantes (Ávarez- Solis, 2010; Quiroga *et al.*, 2015; Jiménez-Tobón *et al.*, 2022).

O agregado de defensivos agrícolas apresenta padrão semelhante, com expansão de 0,66% no longo prazo do cenário de subsídios via gastos com produtividade e 0,55% no orçamento livre com produtividade, mesmo após queda inicial no médio prazo do cenário sem produtividade no orçamento livre (-0,26%). Esse comportamento reflete a integração crescente entre defensivos químicos e biodefensivos no manejo fitossanitário brasileiro, em que o uso combinado predomina sobre a substituição completa, conforme caracterizado por Bettiol *et al.* (2014) na avaliação do controle biológico em sistemas comerciais. A literatura de bioeconomia tem ressaltado que a transição para defensivos biológicos no Brasil é tecnicamente complementar e não excludente, dada a especificidade biológica de cada formulação e a necessidade de rotação de princípios ativos para evitar resistência de pragas (Parra e Coelho Jr., 2019). Destaca-se ainda que o defensivo mais utilizado na lavoura (glifosato), que tem como principal uso o combate de ervas daninhas na lavoura, pelo seu caráter herbicida, ainda não apresenta um biodefensivo comprovado capaz de auxiliar no processo de diminuição do insumo principal.

As lavouras temporárias e permanentes confirmam o protagonismo agrícola na absorção dos efeitos da política, com expansões de 0,95% e 1,00% no longo prazo do cenário via gastos com produtividade, respectivamente. Esses ganhos refletem a maior eficiência produtiva induzida pela adoção dos bioinsumos, particularmente em culturas de alto valor agregado e exposição internacional, em consonância com Caligaris *et al.* (2025) sobre a bioeconomia agrícola tropical. As lavouras permanentes, em particular, apresentam padrão temporal interessante: queda no médio prazo do orçamento livre sem produtividade (-0,30%), seguida de forte recuperação no longo prazo, reflexo do ciclo de adoção tecnológica em culturas perenes que exigem horizonte de aprendizado mais longo antes de produzir ganhos plenos.

**Tabela 7 - Desvios acumulados (Var. %) da produção por produto, por agregado setorial, cenário e horizonte temporal**

| Setor                  | C1    |       |       | C2    |       |       | C3    |       |       | C4   |       |       | C5    |       |       | C6   |       |       |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|
|                        | CP    | MP    | LP    | CP    | MP    | LP    | CP    | MP    | LP    | CP   | MP    | LP    | CP    | MP    | LP    | CP   | MP    | LP    |
| Lavouras temporárias   | 0.02  | -0.40 | 0.24  | 0.02  | 0.05  | 0.86  | 0.09  | 0.21  | 0.29  | 0.02 | 0.09  | 0.90  | 0.10  | 0.25  | 0.37  | 0.02 | 0.09  | 0.95  |
| Lavouras permanentes   | 0.05  | -0.30 | 0.27  | 0.02  | 0.06  | 0.92  | 0.02  | 0.03  | 0.02  | 0.02 | 0.09  | 0.95  | 0.05  | 0.08  | 0.13  | 0.02 | 0.09  | 1.00  |
| Pecuária               | 0.04  | 0.09  | 0.22  | 0.00  | 0.02  | 0.09  | 0.00  | -0.01 | -0.06 | 0.00 | 0.02  | 0.03  | 0.01  | 0.05  | 0.07  | 0.00 | 0.02  | 0.09  |
| Expl. florestal/pesca  | 0.00  | 0.01  | 0.10  | 0.00  | 0.01  | 0.06  | -0.02 | -0.04 | -0.09 | 0.00 | 0.01  | 0.02  | 0.01  | 0.03  | 0.04  | 0.00 | 0.01  | 0.09  |
| Indústria extrativa    | -0.14 | -0.59 | -0.08 | -0.01 | -0.04 | -0.12 | 0.00  | 0.02  | 0.00  | 0.00 | 0.00  | -0.05 | 0.01  | 0.06  | 0.10  | 0.00 | 0.00  | 0.03  |
| Alimentos e bebidas    | -0.03 | -0.06 | 0.18  | 0.00  | 0.01  | 0.15  | -0.01 | -0.03 | -0.08 | 0.00 | 0.01  | 0.10  | 0.01  | 0.05  | 0.06  | 0.00 | 0.02  | 0.15  |
| Indústria diversos     | -0.05 | -0.17 | 0.01  | 0.00  | -0.01 | -0.02 | -0.01 | -0.03 | -0.06 | 0.00 | 0.00  | -0.03 | 0.00  | 0.02  | 0.04  | 0.00 | 0.01  | 0.07  |
| Têxtil/Calçados        | -0.05 | -0.10 | 0.12  | 0.00  | -0.01 | 0.04  | -0.01 | -0.04 | -0.09 | 0.00 | 0.00  | -0.04 | 0.00  | 0.02  | 0.03  | 0.00 | 0.00  | 0.03  |
| Celulose/Papel/Madeira | -0.10 | -0.30 | -0.05 | 0.00  | -0.02 | -0.09 | 0.00  | 0.00  | -0.03 | 0.00 | 0.00  | -0.05 | 0.02  | 0.07  | 0.12  | 0.00 | 0.00  | 0.02  |
| Refino petr./Biocomb.  | 0.02  | 0.13  | 0.21  | 0.00  | 0.02  | 0.16  | 0.00  | 0.00  | -0.01 | 0.00 | 0.01  | 0.07  | 0.02  | 0.06  | 0.11  | 0.00 | 0.02  | 0.16  |
| Química                | -0.06 | -0.22 | 0.12  | 0.00  | -0.01 | 0.03  | 0.16  | 0.35  | 0.41  | 0.00 | 0.00  | 0.02  | 0.17  | 0.39  | 0.50  | 0.00 | 0.01  | 0.10  |
| Fertilizantes          | 0.09  | -0.19 | 0.41  | 0.01  | 0.03  | 0.67  | 0.14  | 0.38  | 0.63  | 0.02 | 0.07  | 0.70  | 0.15  | 0.43  | 0.73  | 0.02 | 0.07  | 0.75  |
| Defensivos             | 0.03  | -0.26 | 0.62  | 0.01  | 0.01  | 0.55  | -0.01 | -0.05 | -0.08 | 0.02 | 0.06  | 0.60  | 0.03  | 0.06  | 0.06  | 0.02 | 0.06  | 0.66  |
| Siderurgia/Metalurgia  | -0.09 | -0.23 | 0.01  | -0.01 | -0.02 | -0.07 | -0.03 | -0.07 | -0.10 | 0.00 | -0.01 | -0.06 | 0.02  | 0.06  | 0.07  | 0.00 | 0.01  | 0.05  |
| Eletro/Informática     | 0.13  | 0.71  | 0.20  | 0.01  | 0.06  | 0.22  | 0.01  | -0.04 | -0.07 | 0.00 | -0.01 | -0.08 | 0.06  | 0.07  | 0.09  | 0.00 | 0.01  | 0.08  |
| Máq./Equip. elétricos  | -0.06 | -0.24 | 0.01  | -0.01 | -0.02 | -0.02 | -0.01 | -0.04 | -0.06 | 0.00 | 0.00  | -0.03 | 0.01  | 0.04  | 0.06  | 0.00 | 0.01  | 0.10  |
| Serviços               | 0.05  | 0.30  | 0.29  | 0.00  | 0.02  | 0.09  | 0.24  | 0.66  | 1.15  | 0.00 | 0.00  | -0.02 | 0.24  | 0.68  | 1.21  | 0.00 | 0.01  | 0.05  |
| Água/Esgoto            | 0.26  | 0.82  | 1.42  | 0.00  | 0.01  | 0.06  | 0.00  | -0.02 | -0.05 | 0.00 | 0.00  | -0.02 | -0.08 | -0.14 | -0.22 | 0.00 | 0.00  | 0.00  |
| Adm. pública           | 0.04  | 0.23  | 0.28  | 0.00  | 0.02  | 0.12  | -0.01 | -0.03 | -0.07 | 0.00 | 0.00  | 0.03  | 0.01  | 0.02  | 0.04  | 0.00 | -0.01 | -0.15 |
| Serviços diversos      | 0.07  | 0.32  | 0.29  | 0.00  | 0.03  | 0.11  | 0.06  | 0.13  | 0.17  | 0.00 | 0.00  | -0.05 | 0.08  | 0.18  | 0.27  | 0.00 | 0.00  | 0.01  |

Notas: CP = curto prazo (2024–2030); MP = médio prazo (2024–2039); LP = longo prazo (2024–2050).

C1: subsídio com orçamento livre (sem produtividade); C2: subsídio com orçamento livre (com produtividade); C3: equilíbrio orçamentário via taxaço (sem produtividade); C4: equilíbrio orçamentário via taxaço (com produtividade); C5: equilíbrio orçamentário via gastos (sem produtividade); C6: equilíbrio orçamentário via gastos (com produtividade).

Fonte: Resultados da pesquisa – Modelo BIO-BR.

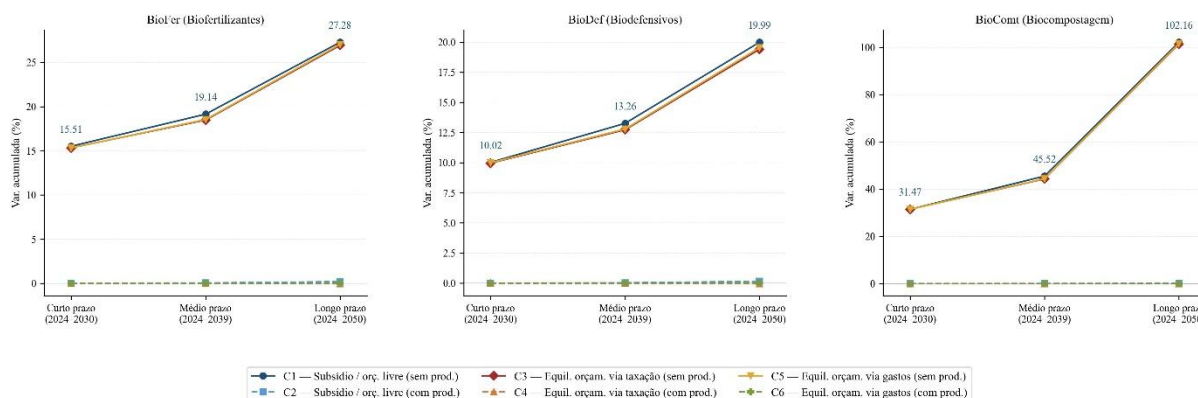
Um achado particularmente revelador é o comportamento do agregado de água, esgoto e resíduos sólidos, que apresenta expansão expressiva no cenário de orçamento livre (1,42% no longo prazo), mas contração no cenário via gastos (-0,22%), ambos sem produtividade. Essa inversão reflete a forte dependência do setor em relação ao desenho fiscal da política: quando o subsídio é financiado livremente, o efeito-renda da expansão econômica se transmite ao saneamento via demanda derivada; quando o financiamento ocorre via corte de gastos públicos (sem produtividade), o próprio setor é pressionado pela contenção orçamentária, dado seu caráter parcialmente público. Esse resultado tem implicação relevante para a discussão sobre infraestrutura associada à bioeconomia, pois a expansão de bioinsumos baseados em resíduos (como a biocompostagem e os biofertilizantes baseados em biometano) pressupõe sistemas adequados de coleta e tratamento de efluentes, conforme apontam Bettiol e Camargo (2006). A política de bioinsumos, portanto, pode entrar em conflito com objetivos de saneamento básico se for financiada via redução de gastos públicos, o que sugere a necessidade de coordenação intersetorial no desenho da transição.

Em síntese, os resultados confirmam que a política de subsídio aos bioinsumos tem efeitos sistêmicos heterogêneos, mobilizando vigorosamente os agregados diretamente vinculados (fertilizantes, defensivos, lavouras), arrastando moderadamente os agregados auxiliares (pecuária, exploração florestal, refino) e gerando tensões alocativas em setores não contemplados pela política, especialmente nos cenários com financiamento via taxação. A administração pública e o setor de água e esgoto emergem como pontos de atenção particular, dada sua sensibilidade ao desenho fiscal escolhido. O recado central é que a transição para uma agricultura mais alinhada aos preceitos da sustentabilidade ambiental, embora viável e potencialmente benéfica, exige coordenação intersetorial cuidadosa para evitar que a política comprometa justamente os pilares institucionais e infraestruturais que sustentam sua eficácia, em consonância com a visão integrada de bioeconomia proposta por Bracco *et al.* (2018) e validada empiricamente por Machado *et al.* (2021) para o caso brasileiro.

A Figura 37 sugere que os efeitos da política sobre o investimento nos setores de bioinsumos são substancialmente mais pronunciados do que os observados sobre o nível de atividade. A biocompostagem (BioComt) lidera com expansão acumulada de 102,16% no longo prazo, mais que dobrando seu estoque de capital em relação ao cenário de referência. Os biofertilizantes (BioFer) alcançam 27,28% e os biodefensivos (BioDef) 19,99% em 2050. Para efeito de comparação, esses valores correspondem a cerca de 2,5 a 2,8 vezes as variações

observadas no nível de atividade dos mesmos setores (39,87%, 15,45% e 12,69%, respectivamente, conforme a Figura 38).

**Figura 38 - Desvios acumulados (Var.%) do investimento (x2tot) dos setores de bioinsumos por cenário e horizonte temporal**



Fonte: Resultados da pesquisa – Modelo BIO-BR.

Essa amplificação é teoricamente esperada e dialoga com a literatura clássica do acelerador do investimento (Jorgenson, 1963): quando setores enfrentam expansão sustentada da demanda e expectativa de retornos crescentes, a resposta do investimento supera proporcionalmente a do produto, pois envolve não apenas a reposição do capital depreciado, mas também a ampliação da capacidade produtiva. O resultado é coerente com a estrutura de modelos EGC dinâmicos com formação endógena de capital, conforme caracterizado por Dixon e Rimmer (2002).

O destaque absoluto da biocompostagem com 31,47% no curto prazo, 45,52% no médio prazo e 102,16% no longo prazo, revela um padrão de aceleração crescente, indicando que o setor está construindo capacidade produtiva em ritmo superior ao dos demais bioinsumos. Três fatores explicam esse comportamento. Primeiro, a biocompostagem parte de uma base de capital relativamente menor na matriz de referência, o que torna os ganhos relativos proporcionalmente maiores. Segundo, trata-se de um setor com menor barreira tecnológica de entrada quando comparado aos biofertilizantes e biodefensivos, que dependem de processos biotecnológicos sofisticados e regulação sanitária mais rigorosa (Parra, 2014). Terceiro, sua cadeia de suprimentos é fortemente integrada com resíduos sólidos e agroindustriais, beneficiando-se diretamente da expansão da agricultura e do setor sucroenergético (biomassa) observada na análise do nível de atividade, por exemplo. Esse achado dialoga com Meemken e

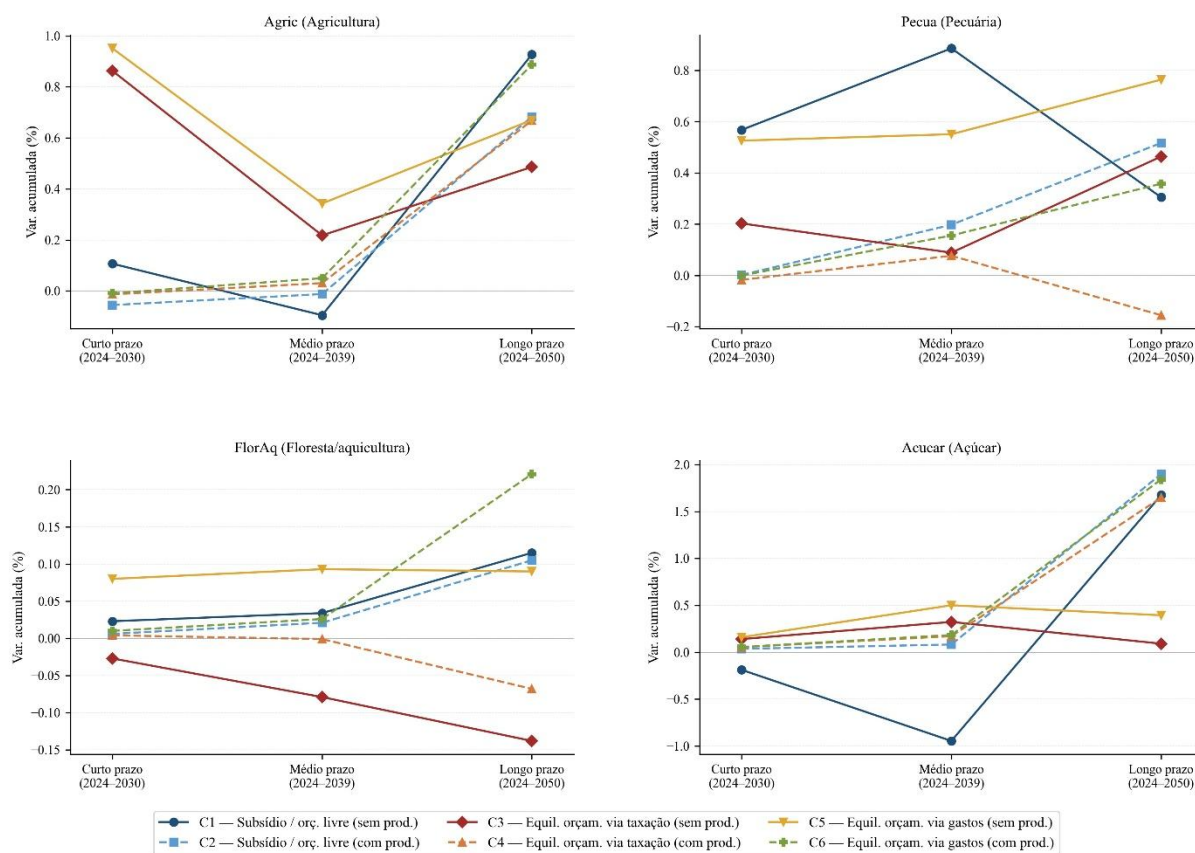
Qaim (2018), que destacam o papel dos sistemas de compostagem como elo de baixo custo entre sustentabilidade e produtividade, particularmente em economias agrícolas tropicais.

Desse modo, os resultados da Figura 38 revelam que a política de bioinsumos induz um esforço de capitalização crescente ao longo do horizonte temporal, com magnitude particularmente notável na biocompostagem. A robustez das trajetórias diante de diferentes mecanismos de financiamento sugere que o estímulo direto à demanda dos bioinsumos é suficiente para mobilizar investimentos privados sustentados, sinalizando viabilidade da transição produtiva proposta.

Esse padrão é compatível com a evidência empírica de bioeconomia em países emergentes (Bracco *et al.*, 2018), que identifica o investimento setorial direcionado como pré-condição estrutural para a consolidação de novas cadeias produtivas. A magnitude dos investimentos observados, especialmente o triplicar da capacidade da biocompostagem, indica que a política não apenas estimula atividade corrente, mas constrói capacidade produtiva permanente, com efeitos potencialmente irreversíveis sobre a estrutura industrial brasileira no horizonte de 2050.

A Figura 39 mostra como cada cadeia agropecuária responde no seu próprio tempo aos diferentes desenhos de política, com a agricultura hesitando antes de investir com força, a pecuária se capitalizando rapidamente, o açúcar apresentando recuperação tardia, mas vigorosa e a floresta/aquicultura sofrendo quando o subsídio é financiado por tributação. Essa heterogeneidade temporal reflete diferenças estruturais entre as cadeias, especialmente quanto ao grau de integração com os bioinsumos, à maturidade tecnológica dos sistemas produtivos e à sensibilidade ao custo do capital, fatores que moldam tanto a velocidade quanto a intensidade da resposta investidora ao estímulo público.

Os ganhos de produtividade suavizam essas oscilações em todos os setores, e os cenários com financiamento via corte de gastos tendem a produzir resultados superiores aos cenários com financiamento via tributos. Esse contraste entre regras fiscais reforça o argumento de Barro (1990) de que a tributação distorce decisões de investimento ao elevar o custo do capital, ao passo que o ajuste pelo lado dos gastos preserva o ambiente de incentivos e mantém a atratividade da capitalização privada. Some-se a isso o fato de que a presença de produtividade endógena reduz a incerteza sobre os retornos da nova tecnologia, encurtando o período de hesitação na adoção e ampliando o efeito multiplicador do subsídio sobre o investimento agregado.

**Figura 39 - Ciclo de investimento (x2tot) em setores relacionados a agropecuária**

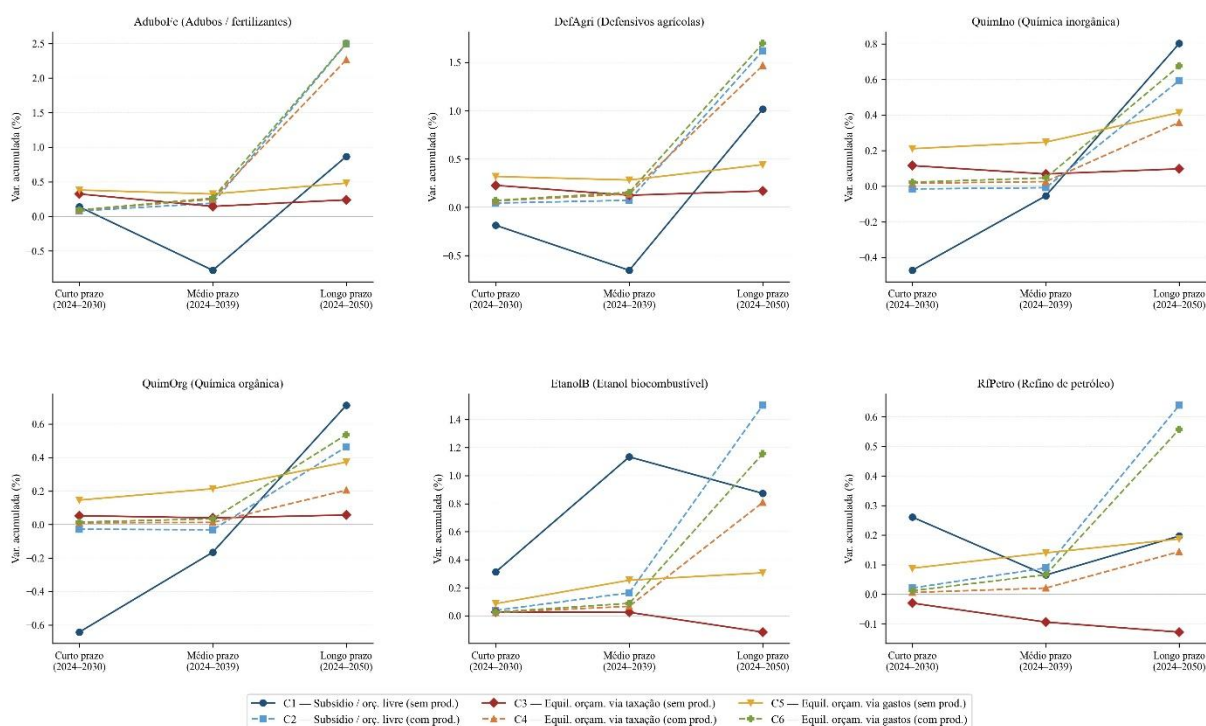
Fonte: Resultados da pesquisa – Modelo BIO-BR.

O conjunto dos resultados evidencia que a política de bioinsumos exige paciência e adequação temporal para a variável de investimento, uma vez que seus efeitos não chegam ao mesmo tempo em todos os setores, mas se consolidam de forma robusta no longo prazo. No caso brasileiro, isso significa que a eficácia do subsídio aos bioinsumos depende menos da magnitude inicial do incentivo e mais da estabilidade do compromisso fiscal e da capacidade de articulação com mecanismos complementares de difusão tecnológica, sem os quais o investimento privado tende a se retrair na fase de maior incerteza.

A experiência recente do país com o Programa Nacional de Bioinsumos, instituído pelo Decreto nº 10.375/2020, oferece um exemplo concreto dessa articulação, ao combinar ações de assistência técnica conduzidas pela Embrapa e pelas Empresas Estaduais de Pesquisa Agropecuária. Esse arranjo institucional sinaliza que o estímulo financeiro, isoladamente, não é suficiente para induzir a transição: os produtores precisam de apoio técnico para incorporar os bioinsumos aos sistemas produtivos e de previsibilidade quanto à continuidade dos incentivos ao longo do tempo.

A indústria química (Figura 40) responde de maneira heterogênea à política de bioinsumos, com setores que se beneficiam pela expansão do mercado total de insumos agrícolas (adubos químicos, defensivos e química inorgânica), setores que sofrem pressão competitiva inicial, mas se recuperam no longo prazo (química orgânica), setores que prosperam via encadeamento sucroenergético (etanol biocombustível) e setores cuja resposta depende criticamente do desenho fiscal (refino de petróleo). Essa diversidade de trajetórias reflete a complexidade das relações intersetoriais em uma cadeia química com múltiplos elos, em que os efeitos de substituição entre químicos e biológicos coexistem com efeitos de complementaridade via expansão da atividade agrícola.

**Figura 40 - Ciclo de investimento (x2tot) em setores relacionados a indústria química**



Os ganhos de produtividade, mais uma vez, atuam como amortecedor das oscilações de curto prazo e amplificador dos ganhos de longo prazo, e os cenários com financiamento via corte de gastos tendem a produzir resultados superiores aos cenários com financiamento via tributos. Machado *et al.* (2021) mostram que a transição para uma economia baseada em biomassa no Brasil gera impactos macroeconômicos pouco expressivos quando há ganhos de

eficiência no uso da terra pela agropecuária, indicando reconfiguração da cadeia produtiva em torno de matérias-primas domésticas e não desindustrialização química.

Philippidis *et al.* (2023), por sua vez, identificam que o financiamento da transição química via tributos pode gerar tensões nos mercados de biomassa e vazamentos ambientais, sendo os melhores resultados obtidos quando há ganhos de produtividade na própria indústria *bio-based*. Esses estudos convergem com o padrão observado nesta Tese, em que os cenários com ajuste pelo lado dos gastos e ganhos de produtividade apresentam o melhor desempenho conjunto, evidenciando que a transição para uma matriz produtiva mais sustentável não implica necessariamente prejuízo para a indústria química convencional, desde que a política seja desenhada com sensibilidade ao tempo de ajuste de cada cadeia e articulada com instrumentos complementares de difusão tecnológica e infraestrutura logística capazes de absorver o aumento da demanda por insumos biológicos sem gerar gargalos de oferta.

A Tabela 8 apresenta a variação acumulada (%) da demanda básica por exportação de dezesseis setores selecionados nos seis cenários. O padrão geral é de efeitos diferenciados entre cadeias: ganhos concentrados nas culturas que utilizam intensivamente biofertilizantes e biodefensivos e pressão competitiva temporária sobre os insumos químicos convencionais.

O destaque é o setor de biodefensivos onde a variação acumulada de 49,45% no longo prazo nos cenários sem produtividade reflete o estágio inicial do mercado brasileiro de bioinsumos, no qual pequenos estímulos fiscais geram respostas elevadas sobre uma base produtiva reduzida (Parra e Coelho, 2019). Já nos cenários com produtividade, a variação torna-se negativa (-2,34%), ou seja, os ganhos de produtividade tornam o produto mais competitivo internamente e redirecionam parte da produção ao mercado interno, em linha com Khanna *et al.* (2017) sobre o predomínio do mercado doméstico nas fases iniciais de difusão

As lavouras exportadoras apresentam ganhos consistentes nos cenários com produtividade da terra, liderados pela laranja (3,64% no longo prazo, orçamento equilibrado com produtividade) e seguidos por outras temporárias, arroz e algodão. O padrão reflete a resposta vigorosa de culturas tropicais de alto valor por hectare à substituição parcial de defensivos químicos por biológicos (Bettiol *et al.*, 2014). Soja e milho registram ganhos próximos (1,4%), coerentes com o protagonismo exportador do país e a incorporação de bioinsumos no manejo dessas commodities após o Decreto nº 10.375/2020. Café (1,29%) e açúcar (0,93%) somam-se ao grupo: o primeiro beneficiado pela convergência entre mercados premium sustentáveis e viabilidade técnica em sistemas certificados (Pereira *et al.*, 2024), o segundo pela resposta da cana ao uso intensivo de biofertilizantes.

Em contraste, adubos e defensivos químicos registram variações negativas em quase todos os cenários ( $-0,16\%$  e  $-0,21\%$  no orçamento livre sem produtividade, longo prazo), confirma o efeito de substituição parcial entre insumos químicos e biológicos no segmento exportador (Kumar *et al.*, 2022). Embora pequenas, as variações indicam que a transição alcança também a competitividade externa dos químicos.

Um padrão recorrente é a inferioridade do cenário com orçamento livre sem produtividade onde praticamente todas as cadeias agrícolas recuam no médio prazo (laranja e outras temporárias chegam a  $-2,6\%$ ) antes de recuperar no longo prazo. Essa trajetória em V reflete o ajuste típico de transições sem suporte tecnológico, em que a incerteza sobre os retornos desestimula temporariamente os investimentos exportadores (Just e Hueth, 1979). A produtividade elimina essa retração, reforçando a difusão tecnológica como condição de êxito da política.

Os valores nulos de cana-de-açúcar, biofertilizantes e biocompostagem decorrem da ausência de cadeia exportadora pois a cana é absorvida internamente (etanol e açúcar) e os dois bioinsumos ainda não consolidaram mercado externo. A implicação é relevante, enquanto os biodefensivos já exibem potencial exportador expressivo, biofertilizantes e biocompostagem permanecem voltados ao mercado interno, sugerindo que o Brasil pode se posicionar primeiro como exportador de tecnologias biológicas de defesa vegetal e, só depois, projetar os demais segmentos, mediante capacidade industrial e logística adicional.

O conjunto dos resultados permite afirmar que o desenho de política mais promissor para o Brasil combina subsídio direto aos bioinsumos, sustentação de ganhos de produtividade via investimento em pesquisa e extensão rural, equilíbrio orçamentário pelo lado dos gastos com salvaguardas para setores públicos sensíveis e horizonte temporal estendido de avaliação. Esse arranjo, representado pelo cenário de orçamento equilibrado via gastos com produtividade nas simulações, é compatível com a experiência institucional recente do país, especialmente o Programa Nacional de Bioinsumos (Decreto nº 10.375/2020), e oferece um caminho para que a transição produtiva ocorra sem comprometer a base industrial estabelecida nem os pilares fiscais e institucionais necessários à sua consolidação.

**Tabela 8 - Desvios acumulados (Var. %) da demanda básica por exportação dos setores agrícolas, bioinsumos e cadeias relacionadas, por cenário e horizonte temporal**

| Setor                   | C1    |       |       | C2    |       |       | C3    |       |       | C4    |       |       | C5    |       |       | C6    |       |       |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                         | CP    | MP    | LP    | CP    | MP    | LP    | CP    | MP    | LP    | CP    | MP    | LP    | CP    | MP    | LP    | CP    | MP    | LP    |
| Arroz em casca          | 0.02  | -1.26 | 0.32  | 0.05  | 0.10  | 1.77  | 0.24  | 0.54  | 0.61  | 0.06  | 0.22  | 1.93  | 0.25  | 0.58  | 0.69  | 0.06  | 0.22  | 1.97  |
| Milho                   | -0.09 | -1.16 | 0.27  | 0.03  | 0.07  | 1.29  | 0.18  | 0.42  | 0.44  | 0.05  | 0.17  | 1.42  | 0.18  | 0.46  | 0.52  | 0.05  | 0.17  | 1.46  |
| Algodão                 | 0.02  | -0.98 | 0.31  | 0.04  | 0.09  | 1.41  | 0.19  | 0.46  | 0.48  | 0.05  | 0.19  | 1.53  | 0.20  | 0.50  | 0.56  | 0.05  | 0.19  | 1.56  |
| Cana-de-açúcar          | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  |
| Soja                    | 0.01  | -0.92 | 0.29  | 0.04  | 0.08  | 1.28  | 0.18  | 0.41  | 0.43  | 0.04  | 0.17  | 1.38  | 0.18  | 0.44  | 0.51  | 0.04  | 0.17  | 1.42  |
| Outras lav. temporárias | -0.19 | -2.42 | 0.22  | 0.06  | 0.09  | 2.15  | 0.34  | 0.74  | 0.79  | 0.08  | 0.30  | 2.51  | 0.34  | 0.79  | 0.90  | 0.09  | 0.31  | 2.56  |
| Laranja                 | -0.06 | -2.63 | 0.38  | 0.09  | 0.17  | 3.17  | 0.43  | 1.02  | 1.15  | 0.11  | 0.41  | 3.63  | 0.43  | 1.05  | 1.23  | 0.11  | 0.41  | 3.64  |
| Café                    | 0.00  | -0.79 | 0.27  | 0.03  | 0.07  | 1.16  | 0.15  | 0.35  | 0.38  | 0.04  | 0.14  | 1.25  | 0.16  | 0.39  | 0.47  | 0.04  | 0.15  | 1.29  |
| Outras lav. permanentes | -0.21 | -2.15 | 0.18  | 0.04  | 0.06  | 1.63  | 0.28  | 0.62  | 0.59  | 0.07  | 0.25  | 1.90  | 0.28  | 0.66  | 0.69  | 0.07  | 0.25  | 1.95  |
| Açúcar                  | -0.17 | -1.08 | 0.05  | 0.01  | 0.01  | 0.74  | 0.09  | 0.24  | 0.26  | 0.02  | 0.10  | 0.89  | 0.10  | 0.27  | 0.33  | 0.03  | 0.11  | 0.93  |
| Adubos/Fertilizantes    | -0.36 | -1.02 | -0.16 | -0.02 | -0.10 | -0.21 | -0.06 | -0.08 | -0.15 | -0.01 | -0.03 | -0.16 | -0.04 | -0.02 | -0.03 | 0.00  | -0.02 | -0.07 |
| Biofertilizantes        | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  |
| Defensivos químicos     | -0.39 | -1.22 | -0.21 | -0.02 | -0.10 | -0.21 | -0.04 | -0.06 | -0.13 | 0.00  | -0.02 | -0.12 | -0.02 | -0.01 | -0.01 | 0.00  | -0.01 | -0.03 |
| Biodefensivos           | 9.85  | 28.4  | 49.5  | -0.06 | -0.19 | -2.34 | 9.93  | 27.6  | 49.6  | -0.06 | -0.22 | -2.35 | 9.88  | 27.4  | 49.3  | -0.06 | -0.23 | -2.48 |
| Água/Esgoto             | -0.44 | -1.30 | -0.22 | -0.02 | -0.11 | -0.33 | -0.01 | -0.05 | -0.08 | 0.00  | -0.01 | -0.06 | -0.01 | -0.02 | -0.02 | 0.00  | 0.00  | -0.04 |
| Biocompostagem          | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  |

Notas: CP = curto prazo (2024–2030); MP = médio prazo (2024–2039); LP = longo prazo (2024–2050).

C1: subsídio com orçamento livre (sem produtividade); C2: subsídio com orçamento livre (com produtividade); C3: equilíbrio orçamentário via taxaço (sem produtividade); C4: equilíbrio orçamentário via taxaço (com produtividade); C5: equilíbrio orçamentário via gastos (sem produtividade); C6: equilíbrio orçamentário via gastos (com produtividade).

*Os setores cana-de-açúcar, biofertilizantes e biocompostagem apresentam valores nulos por não constituírem objeto de exportação na matriz utilizada.*

Fonte: Resultados da pesquisa – Modelo BIO-BR.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A bioeconomia consolidou-se, ao longo das últimas duas décadas, como um dos eixos estruturantes da reorganização produtiva mundial, mobilizando estratégias nacionais coordenadas em torno do uso intensivo de processos biológicos e orgânicos como vetor de transição tecnológica e de desenvolvimento agrícola sustentável. Nesse movimento, os bioinsumos agrícolas emergem como instrumento central da reconfiguração da base produtiva da agricultura, ao articularem ganhos de produtividade, redução de externalidades ambientais e diminuição da dependência de insumos químicos importados. No plano internacional, o mercado global de bioinsumos vem registrando taxas de crescimento sustentadas e superiores às dos insumos químicos convencionais, com projeções que apontam para sua consolidação como segmento estratégico do agronegócio mundial nas próximas décadas. No Brasil, esse processo encontra condições estruturais particularmente favoráveis: a base agroindustrial diversificada, a excelência da pesquisa agropecuária consolidada pela Embrapa e por instituições estaduais, a abundância de biodiversidade utilizável e a robustez do mercado interno conferem ao país posição privilegiada na disputa pela liderança global do setor. A evolução institucional acompanhou esse movimento, com a instituição do Programa Nacional de Bioinsumos pelo Decreto nº 10.375/2020, a expansão expressiva do número de empresas registradas e do faturamento setorial entre 2020 e 2023 e, mais recentemente, com a consolidação do marco legal estabelecido pela Lei nº 15.070/2024. A confluência entre maturidade institucional, dinamismo de mercado e capacidade científica instalada estabelece o pano de fundo no qual se inserem as questões investigadas nesta Tese.

A pesquisa orientou-se pelo propósito de identificar as condições fiscais e tecnológicas sob as quais a política de fomento aos bioinsumos no Brasil produz efeitos macroeconômicos sustentáveis, ganhos distributivos progressivos e reconfiguração setorial coerente com os objetivos da transição produtiva sustentável. O exame dessas condições exigiu o desenvolvimento de instrumental analítico capaz de capturar, de modo simultâneo, a heterogeneidade tecnológica entre fertilizantes químicos e biofertilizantes, a possibilidade de ganhos de produtividade da terra e a sensibilidade dos resultados ao regime de fechamento fiscal adotado. O Modelo BIO-BR, desenvolvido ao longo da pesquisa, articula esses elementos em uma estrutura de equilíbrio geral computável dinâmico recursivo, calibrada para a economia brasileira e operacionalizada em seis cenários de política organizados em três pares de regime fiscal.

Os achados macroeconômicos da pesquisa convergem para uma constatação de relevância imediata para o desenho da política: o regime de fechamento fiscal explica fração substancialmente maior da variação dos resultados agregados do que o próprio canal tecnológico. A distância entre o efeito líquido do orçamento livre e o do equilíbrio fiscal via taxação supera, em quase uma ordem de grandeza, qualquer efeito atribuível à incorporação dos ganhos de produtividade da terra. A arquitetura de equilíbrio orçamentário via realocação de gastos configura-se como a alternativa mais virtuosa em desempenho macroeconômico conjunto, ao combinar expansão sustentável da renda e do consumo, criação de postos de trabalho, elevação salarial, ampliação das exportações e desinflação progressiva. O orçamento livre, embora produza os maiores ganhos nominais, opera mediante pressão inflacionária expressiva e deterioração da posição externa, comprometendo a sustentabilidade dos ganhos. O equilíbrio via taxação, por sua vez, neutraliza ou inverte os benefícios pretendidos pela política em razão do custo distorcivo da elevação tributária, reforçando, no contexto brasileiro, a evidência consolidada sobre o custo marginal de fundos públicos em economias com carga tributária elevada e estrutura fragmentada.

Os achados distributivos aprofundam essa leitura ao revelar que a realocação de gastos públicos é a única arquitetura simulada capaz de combinar sustentabilidade fiscal e progressividade distributiva, especialmente quando associada aos ganhos de produtividade dos bioinsumos. O cenário que articula essas duas dimensões apresenta o padrão progressivo mais nítido do conjunto de simulações, com ganhos de bem-estar concentrados nos estratos mais vulneráveis e leve perda restrita ao estrato superior. Esse perfil articula três atributos raramente reunidos em exercícios de simulação: cumprimento da restrição orçamentária, ganho efetivo de bem-estar para a maioria da população e direcionamento dos benefícios aos estratos mais pobres. A leitura comparativa entre renda real e utilidade revelou ainda descoberta analítica de natureza substantiva, pois os ganhos de produtividade dos bioinsumos não atuam apenas como amplificadores de eficiência setorial, mas também como vetor de redistribuição operando pelo canal de preços, ao reduzir o custo relativo da cesta de consumo dos estratos cuja renda é mais sensível ao preço dos alimentos. Essa interpretação, ausente na literatura aplicada brasileira sobre transição agrícola sustentável, constitui contribuição empírica original da tese, ao demonstrar que o efeito redistributivo da política opera por mecanismo silencioso e pouco explorado nas avaliações convencionais focadas exclusivamente em transferências diretas.

Os achados setoriais consolidam essa narrativa ao demonstrar que a política reconfigura estruturalmente a base produtiva brasileira sem comprometer a coexistência com a indústria

química convencional. A biocompostagem lidera a expansão setorial, seguida pelos biofertilizantes e biodefensivos, e os efeitos de transbordamento revelam-se assimétricos, com as cadeias agropecuárias exportadoras emergindo como principais beneficiárias indiretas, ao passo que a indústria química, contrariando a expectativa intuitiva de prejuízo competitivo, apresenta trajetórias positivas em adubos químicos, defensivos agrícolas e química inorgânica. Esse achado configura padrão de coexistência tecnológica em que a expansão do mercado total compensa a substituição parcial entre insumos químicos e biológicos, evidência que desconstrói a leitura recorrente, presente em parte do debate aplicado ao agronegócio brasileiro, sobre suposta incompatibilidade entre a expansão dos bioinsumos e a manutenção do parque agroquímico nacional. Trata-se de contribuição empírica relevante para a interlocução entre a pesquisa econômica e o debate público sobre a política, ao demonstrar que os interesses do setor químico convencional e da agenda de transição agroecológica não são necessariamente antagônicos no horizonte de longo prazo.

A diferenciação observada entre os três tipos de bioinsumos sustenta agenda estratégica gradual de inserção internacional, dimensão que constitui contribuição da Tese ao debate sobre comércio exterior agrícola brasileiro. Os biodefensivos, que já apresentam dupla vocação interna e exportadora, podem ser tratados desde já como produtos de inserção internacional imediata, com ganhos de competitividade comercial significativos. Os biofertilizantes e a biocompostagem, voltados predominantemente ao mercado doméstico, demandam estágio prévio de fortalecimento da cadeia logística, regulatória e de infraestrutura básica antes de qualquer projeção internacional. Essa sequência reflete não uma limitação da política, mas o reconhecimento de que a transição produtiva brasileira se constrói em camadas, partindo do mercado interno robusto rumo à inserção externa qualificada. Tal recomendação só pode ser formulada de modo fundamentado a partir do tratamento desagregado dos três setores adotado nesta Tese, contribuição que diferencia a presente pesquisa das aproximações agregadas que tratam a bioeconomia como bloco homogêneo.

A integração das três dimensões analíticas oferece, em conjunto, mensagem central de política que constitui a contribuição mais ampla da tese ao debate aplicado: a política de bioinsumos não se reduz a problema técnico-econômico, mas constitui problema de desenho institucional cuja solução articula prioridades fiscais, escolhas tecnológicas e objetivos distributivos. Sob arquitetura institucional adequada, a política realiza simultaneamente os múltiplos objetivos da agenda contemporânea de transformação produtiva, com destaque para ampliação da renda agregada, geração de emprego, ganhos de competitividade externa,

redistribuição em favor dos estratos mais vulneráveis e reconfiguração setorial coerente com a transição agrícola sustentável. Sob arquiteturas alternativas, esses objetivos colidem ou se anulam mutuamente, transformando a política em instrumento de potencial regressividade distributiva ou de comprometimento fiscal. Essa leitura sistêmica, articulada a partir de seis cenários e três horizontes temporais, oferece subsídios concretos para a regulamentação do novo marco legal dos bioinsumos brasileiro e para o desenho dos instrumentos complementares de pesquisa, extensão e difusão tecnológica que sustentam a viabilidade prática da política. Nesse sentido, recomenda-se que a regulamentação da Lei nº 15.070/2024 considere explicitamente a criação de cláusulas de desempenho tecnológico atreladas aos subsídios, de modo que o benefício fiscal esteja condicionado à efetiva obtenção de ganhos de produtividade. Tal condicionalidade alinha o instrumento ao cenário de subsídios via gastos do governo, no qual a vinculação entre subsídio e produtividade é justamente a condição que assegura os melhores resultados macroeconômicos, distributivos e setoriais, evitando que o estímulo fiscal se converta em mera substituição de insumos sem ampliação do produto agregado.

A contribuição da tese ao debate brasileiro sobre transição produtiva sustentável organiza-se, portanto, em quatro frentes complementares. Em primeiro lugar, oferece instrumental analítico inédito no contexto nacional, capaz de simular simultaneamente efeitos de escala e efeitos tecnológicos da política de bioinsumos, sob diferentes regimes fiscais. Em segundo lugar, apresenta a primeira quantificação sistêmica dos efeitos macroeconômicos, distributivos e setoriais dessa política para a economia brasileira, oferecendo subsídios empíricos para o debate institucional em curso. Em terceiro lugar, identifica mecanismo redistributivo silencioso operando pelo canal de preços dos alimentos, dimensão até então ausente das avaliações convencionais sobre transição agroecológica. Em quarto lugar, demonstra a viabilidade técnica da coexistência entre expansão dos bioinsumos e manutenção do parque agroquímico tradicional, desconstruindo leitura recorrente sobre suposta incompatibilidade entre essas duas dimensões da política agrícola brasileira.

Os achados da tese refletem, contudo, o horizonte temporal e o instrumental analítico empregados na simulação, e comportam limitações que merecem reconhecimento explícito. A janela 2024-2050, embora ampla, pode não capturar plenamente os efeitos cumulativos da transição sobre a fertilidade do solo, a regeneração da biodiversidade e a redução de externalidades de saúde, dimensões cuja maturação plena pode requerer décadas adicionais. A representação estilizada do canal tecnológico, especificada em forma log-linear com elasticidade comum entre setores, captura o mecanismo central de modo parcimonioso, mas

não representa heterogeneidades intersetoriais potencialmente relevantes na resposta dos diferentes cultivos aos bioinsumos. O tratamento agregado das famílias em dez estratos representativos, embora capture as principais heterogeneidades distributivas, não contempla dimensões adicionais como recorte regional, rural-urbano ou por tipo de inserção produtiva.

Essas limitações configuram, simultaneamente, agenda promissora de pesquisa futura. Uma frente relevante diz respeito à mensuração dos efeitos da expansão dos bioinsumos sobre as emissões de gases de efeito estufa, dimensão central do debate contemporâneo sobre transição agrícola e cuja avaliação sistêmica permitiria conectar diretamente os achados macroeconômicos da tese aos compromissos climáticos brasileiros assumidos em fóruns internacionais. Outra frente promissora envolve a análise da relação entre demanda por bioinsumos e segurança alimentar, articulando os canais de preços relativos identificados nesta pesquisa às dimensões de acesso, qualidade e estabilidade da oferta de alimentos para os diferentes estratos populacionais. O instrumental desenvolvido nesta tese oferece plataforma analítica adequada para todas essas extensões, configurando agenda de pesquisa futura cujo desenvolvimento pode contribuir substancialmente para o debate aplicado sobre o futuro da agricultura brasileira.

Em síntese, o Brasil dispõe, no momento desta pesquisa, das condições estruturais necessárias para liderar globalmente a transição agrícola ambientalmente sustentável via bioinsumos: mercado consumidor robusto, base agroindustrial consolidada, instituições de pesquisa de excelência e marco regulatório moderno e específico. A consolidação dessa liderança, contudo, requer escolhas institucionais explícitas e tecnicamente fundamentadas, escolhas para as quais esta Tese pretende ter oferecido contribuição substantiva, ao demonstrar que a transição para uma matriz produtiva mais alinhada aos preceitos de uma agricultura sustentável é tecnicamente viável e economicamente benéfica para o país, desde que estruturada sob arquitetura institucional que articule sustentabilidade fiscal, ganhos de produtividade e progressividade distributiva. O caminho do Brasil rumo à liderança global em bioeconomia agrícola depende, em última análise, da capacidade de traduzir essa convergência analítica em decisões institucionais coerentes, tarefa cuja urgência se evidencia tanto pela maturidade do marco regulatório recém-consolidado quanto pelo dinamismo do mercado interno e externo de bioinsumos no horizonte da próxima década.

## 7 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

ABEL, A. B.; EBERLY, J. C. A unified model of investment under uncertainty. **American Economic Review**, v. 84, n. 5, p. 1369-1384, 1994.

ABBUD, J. M., & CECHIN, A. (2026). Bio-inputs for agriculture in Brazil: why can't the alternative become mainstream?. **Brazilian Journal of Political Economy**, 46(1), e263739.

AGROLINK. **Dependência de fertilizantes expõe agro brasileiro a riscos geopolíticos e reforça urgência da transição verde**. Agrolink, 2026. Disponível em: [https://www.agrolink.com.br/noticias/dependencia-de-fertilizantes-expoe-agro-brasileiro-a-riscos-geopoliticos-e-reforca-urgencia-da-transicao-verde\\_513198.html](https://www.agrolink.com.br/noticias/dependencia-de-fertilizantes-expoe-agro-brasileiro-a-riscos-geopoliticos-e-reforca-urgencia-da-transicao-verde_513198.html). Acesso em: 25 ago. 2026.

ALMEIDA, A. N. Elasticidades renda e preços: análise do consumo familiar a partir dos dados da POF 2008/2009. **Núcleo de Economia Regional e Urbana da Universidade de São Paulo (NEREUS)**, 2011.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS (ANDA). **Principais indicadores do setor de fertilizantes**. São Paulo: ANDA, 2026. Disponível em: <https://anda.org.br/>. Acesso em: 25 ago. 2026.

ACEMOGLU, D.; AKCIGIT, U.; ALP, H.; BLOOM, N.; KERR, W. Innovation, reallocation, and growth. **American Economic Review**, v. 108, n. 11, p. 3450-3491, 2018.

ACEMOGLU, D.; RESTREPO, P. The race between man and machine: implications of technology for growth, factor shares, and employment. **American Economic Review**, v. 108, n. 6, p. 1488-1542, 2018.

ACEMOGLU, D.; VENTURA, J. The world income distribution. **Quarterly Journal of Economics**, v. 117, n. 2, p. 659-694, 2002.

ADAMS, P. D.; PARMENTER, B. R. Computable general equilibrium modelling of environmental issues in Australia: economic impacts of an emissions trading scheme. In: DIXON, P. B.; JORGENSEN, D. (ed.). **Handbook of Computable General Equilibrium Modeling**. Amsterdam: North-Holland, 2013. v. 1, p. 553-657.

AGHION, P.; HOWITT, P. **The economics of growth**. Cambridge, MA: MIT Press, 2009.

AGROFIT. **Sistema de Agrotóxicos Fitossanitários**. Brasília: Ministério da Agricultura e Pecuária, 2024. Disponível em: <https://agrofit.agricultura.gov.br>. Acesso em: 12 jan. 2026.

AGUIAR, A.; CHEPELIEV, M.; CORONG, E.; McDOUGALL, R.; VAN DER MENSBRUGGHE, D. The GTAP data base: version 10. **Journal of Global Economic Analysis**, v. 4, n. 1, p. 1-27, 2019.

AGUILAR, A.; MAGNIEN, E.; THOMAS, D. Thirty years of European biotechnology programmes. **New Biotechnology**, v. 30, p. 410-425, 2013.

ALBERT, S. Transition to a bio-economy. **Journal of Rural Community Development**, v. 2, p. 64-83, 2007.

ALBRECHT, S. *et al.* Bio-economy at a crossroads. **GAIA**, v. 21, p. 33-37, 2012.

ALESINA, A.; ARDAGNA, S. Large changes in fiscal policy: taxes versus spending. **Tax Policy and the Economy**, v. 24, n. 1, p. 35-68, 2010.

ALESINA, A.; FAVERO, C.; GIAVAZZI, F. **Austerity: when it works and when it doesn't**. Princeton: Princeton University Press, 2019.

ALESINA, A.; FAVERO, C.; GIAVAZZI, F. Effects of austerity: expenditure- and tax-based approaches. **Journal of Economic Perspectives**, v. 33, n. 2, p. 141-162, 2019.

ALSTON, J. M.; NORTON, G. W.; PARDEY, P. G. **Science under scarcity: principles and practice for agricultural research evaluation and priority setting**. Ithaca: Cornell University Press, 1995.

ALSTON, J. M. *et al.* **A meta-analysis of rates of return to agricultural R&D**. Washington, DC: International Food Policy Research Institute, 2000. (IFPRI Research Report, n. 113).

ALTIERI, Miguel A.; NICHOLLS, Clara Inés. Do modelo agroquímico à agroecologia: a busca por sistemas alimentares saudáveis e resilientes em tempos de COVID-19. **Desenvolvimento e Meio ambiente**, v. 57, 2021.

ÁLVAREZ-SOLÍS, J. D.; GÓMEZ-VELASCO, D.; LEÓN-MARTÍNEZ, N. S.; GUTIÉRREZ-MICELI, F. A. Manejo integrado de fertilizantes y abonos orgánicos en el cultivo de maíz. **Agrociencia**, v. 44, n. 5, p. 575-586, 2010.

ANDA – ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS. **Principais indicadores do setor de fertilizantes 2025**. São Paulo: ANDA, 2025. Disponível em: [https://anda.org.br/wp-content/uploads/2025/04/Principais\\_Indicadores\\_2025.pdf](https://anda.org.br/wp-content/uploads/2025/04/Principais_Indicadores_2025.pdf). Acesso em: 6 ago. 2025.

ANDERSON, K.; MARTIN, W.; VAN DER MENSBRUGGHE, D. **Doha merchandise trade reform: what's at stake for developing countries?** Washington, DC: World Bank, 2006. (Policy Research Working Paper, n. 3848).

ANTLE, J. M.; PINGALI, P. L. Pesticides, Productivity, and Farmer Health: A Philippine Case Study. **Impact of Pesticides on Farmer Health and the Rice Environment**, p. 361-387, 1995. DOI: 10.1007/978-94-011-0647-4\_13.

ARAGÃO, A.; CONTINI, E. **O agro no Brasil e no mundo: uma síntese do período de 2000 a 2020**. Brasília: Embrapa SIRE, 2021. p. 1-68.

ARMINGTON, P. S. A theory of demand for products distinguished by place of production. **Staff Papers - International Monetary Fund**, v. 16, n. 1, p. 159-178, 1969. DOI: 10.2307/3866403.

ASAD, M.; AHMED, S. Y. Utilizing biofertilizer for achieving sustainable agriculture and rural development strategy towards Vision 2040, Oman. **Sustainability**, v. 16, n. 10, art. 4015, 2024.

ASCHAUER, D. A. Is public expenditure productive? **Journal of Monetary Economics**, v. 23, n. 2, p. 177-200, 1989. DOI: 10.1016/0304-3932(89)90047-0.

AUERBACH, A. J. The theory of excess burden and optimal taxation. In: AUERBACH, A. J.; FELDSTEIN, M. (ed.). **Handbook of Public Economics**. Amsterdam: North-Holland, 1985. v. 1.

BAHADUR, G.; MORRISON, M. Patenting human pluripotent cells. **Human Reproduction**, v. 25, p. 14-21, 2010.

BALASSA, B. The purchasing-power parity doctrine: a reappraisal. **Journal of Political Economy**, v. 72, n. 6, p. 584-596, 1964.

BALEZENTIS, T. *et al.* Young farmers' support under the Common Agricultural Policy and sustainability of rural regions: evidence from Lithuania. **Land Use Policy**, v. 94, art. 104542, 2020.

BALLARD, C. L.; FULLERTON, D. Distortionary taxation and the provision of public goods. **Journal of Economic Perspectives**, v. 6, n. 4, p. 117-131, 1992.

BANCO MUNDIAL. **Detox development**: repurposing environmentally harmful subsidies. Washington, DC: World Bank Group, 2023.

BANDARA, J. S. Computable general equilibrium models for development policy analysis in LDCs. **Journal of Economic Surveys**, v. 5, n. 1, p. 3-69, 1991.

BANN, S. J. *et al.* The costs of production of alternative jet fuel: a harmonized stochastic assessment. **Bioresource Technology**, v. 227, p. 179-187, 2017.

BARREIRO HURLE, J. *et al.* **Modelling environmental and climate ambition in the agricultural sector with the CAPRI model**. Sevilha: Joint Research Centre, 2021. (JRC121368).

BARRO, R. J. Government spending in a simple model of endogenous growth. **Journal of Political Economy**, v. 98, n. 5, p. S103-S125, 1990. DOI: 10.1086/261726.

BARROS, G. S. de C. Agricultura, crescimento e pobreza: lições da história e perspectivas. In: IPEA. **Agricultura e desenvolvimento no Brasil**. Brasília: IPEA, 2010.

BARTELINGS, H.; VERMA, M.; BOYSEN-URBAN, K. **Waste management and circular economy in a CGE framework**. 2021.

BARTELINGS, H., KAVALLARI, A., VAN MEIJL, H., VON LAMPE, M. Estimating the impact of fertilizer support policies: A CGE approach. 2016

BATINI, N.; EYRAUD, L.; FORNI, L.; WEBER, A. **Fiscal multipliers**: size, determinants, and use in macroeconomic projections. Washington, DC: International Monetary Fund, 2014. (IMF Technical Notes and Manuals).

BAXTER, M.; KING, R. G. Fiscal policy in general equilibrium. **American Economic Review**, v. 83, n. 3, p. 315-334, 1993.

BECKMAN, J. *et al.* **Economic and food security impacts of agricultural input reduction under the European Union Green Deal's Farm to Fork and biodiversity strategies.** Washington, DC: USDA, 2020.

BECKMAN, J., IVANIC, M., JELLIFFE, J. Market impacts of Farm to Fork: Reducing agricultural input usage. **Applied Economic Perspectives and Policy**, 44(4), 1995-2013. 2022.

BERNARD, A. B.; JENSEN, J. B.; REDDING, S. J.; SCHOTT, P. K. Firms in international trade. **Journal of Economic Perspectives**, v. 21, n. 3, p. 105-130, 2007.

BETARELLI JUNIOR, A. A. **Um modelo de equilíbrio geral com retornos crescentes de escala, mercados imperfeitos e barreiras à entrada: aplicações para setores regulados de transporte no Brasil.** 2013. 366 f. 2013. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em Economia) –Centro de Desenvolvimento e Planejamento Regional da Universidade Federal de Minas Gerais (CEDEPLAR/UFGM).

BETARELLI JR, A. A., DOMINGUES, E. P., HEWINGS, G. J. D. Transport policy, rail freight sector and market structure: The economic effects in Brazil. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, 135, 1-23. 2020

BETARELLI JUNIOR, A. A; DOMINGUES, E. P. Efeitos econômicos da proposta de redução tarifária sobre as operações domésticas de cabotagem no Brasil (2013-2025). 2014.

BETARELLI JUNIOR, A. A. **Efeitos econômicos da renovação dos contratos de concessão das empresas ferroviárias no sistema produtivo mineiro.** Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora, 2022. Projeto financiado pela FAPEMIG.

BETARELLI JUNIOR, A. A. **Facilitação de comércio, sistemas produtivos e efeitos regionais:** uma modelagem para a avaliação das políticas do setor portuário no Brasil. Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora, 2023. Projeto financiado pelo CNPq.

BETARELLI JUNIOR, A. A. *et al.* Caracterização da indústria nacional de SAF por suas diversas regiões a partir do padrão de custos e de demanda estabelecidos no sistema econômico, considerando especialmente os principais serviços de abastecimento dos aeroportos. In: CAMPO, F. *et al.* (org.). **Estudos acerca das alternativas do setor aéreo relacionados ao uso de SAF, Sustainable Aviation Fuel.** Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora, 2022.

BETTIOL, W.; CAMARGO, O. **Lodo de esgoto.** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006.

BETTIOL, W.; MORANDI, M. A. B.; PINTO, Z. V.; PAULA JÚNIOR, T. J.; CORRÊA, E. B.; MOURA, A. B.; LUCON, C. M. M.; COSTA, J. C. B.; BEZERRA, J. L. **Produtos comerciais à base de agentes de biocontrole de doenças de plantas.** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2014. 155 p. (Documentos, n. 88).

BETTIOL, W. *et al.* Produtos comerciais à base de Trichoderma. In: MEYER, M. C.; MAZARO, S. M.; SILVA, J. C. (ed.). **Trichoderma:** uso na agricultura. Brasília: Embrapa, 2019. p. 45-160.

BHATTACHARYYA, C. *et al.* Biofertilizers as substitute to commercial agrochemicals. In: **Agrochemicals detection, treatment and remediation**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2020. p. 263-290.

BHATTACHARYYA, P. N. *et al.* Biofertilizers as a nexus between soil fertility and crop productivity under abiotic stress. **Current Research in Environmental Sustainability**, v. 3, art. 100063, 2021.

BIRCH, K. Geographies of value in the bioeconomy. **New Genetics and Society**, v. 31, p. 183-201, 2012.

BIRCH, K. The knowledge-space dynamic. **Area**, v. 41, p. 273-284, 2009.

BLANCHARD, O. Crowding out. In: DURLAUF, S.; BLUME, L. (ed.). **The New Palgrave Dictionary of Economics**. 2. ed. London: Palgrave Macmillan, 2007.

BLANCHARD, O. Public debt and low interest rates. **American Economic Review**, v. 109, n. 4, p. 1197-1229, 2019.

BLANCHARD, O.; PEROTTI, R. An empirical characterization of the dynamic effects of changes in government spending and taxes on output. **The Quarterly Journal of Economics**, v. 117, n. 4, p. 1329-1368, 2002. DOI: 10.1162/003355302320935043.

BRACCO, S., CALICIOGLU, O., GOMEZ SAN JUAN, M., & FLAMMINI, A. Assessing the contribution of bioeconomy to the total economy: A review of national frameworks. **Sustainability**, 10(6), 1698. 2018.

BOEHLJE, M.; BRÖRING, S. Multifunctionality of agricultural raw materials. **International Food and Agribusiness Management Review**, v. 14, p. 1-16, 2011.

BOMFIM, C. A. *et al.* Brief history of biofertilizers in Brazil: from conventional approaches to new biotechnological solutions. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 52, n. 4, p. 2215-2232, 2021.

BOLLEN, J. The value of air pollution co-benefits of climate policies: analysis with a global sector-trade CGE model called WorldScan. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 90, p. 178-191, 2015.

BORDES, P.; POLLET, E.; AVEROUS, L. Nano-biocomposites: biodegradable polyester/nanoclay systems. **Progress in Polymer Science**, v. 34, p. 125-155, 2009.

BORGATTI, S. P. Centrality and network flow. **Social Networks**, v. 27, p. 55-71, 2005.

BORGATTI, S. P. **NetDraw**: Graph Visualization Software. Lexington: Analytic Technologies, 2002.

BORGATTI, S. P.; EVERETT, M. G.; FREEMAN, L. C. **Ucinet for Windows**: Software for Social Network Analysis. Lexington: Analytic Technologies, 2002.

BORLAUG, N. Feeding a hungry world. **Science**, v. 318, n. 5849, p. 359, 2007.

BOULANGER, P. et al. Effectiveness of fertilizer policy reforms to enhance food security in Kenya: a macro-micro simulation analysis. **Applied Economics**, v. 54, n. 8, p. 841-861, 2022. DOI: 10.1080/00036846.2020.1808180

BOULANGER, P., DUDU, H., FERRARI, E., MAINAR-CAUSAPÉ, A., PROIETTI, I. Boosting the fertilizer production in Kenya: a CGE analysis. **Joint Research Centre (Seville site), EUR**, 28695. 2017.

BOZELL, J. J.; PETERSEN, G. R. Technology development for the production of biobased products from biorefinery carbohydrates: the US Department of Energy's "top 10" revisited. **Green Chemistry**, v. 12, p. 539-554, 2010.

BRASIL. **Decreto nº 10.605, de 22 de janeiro de 2021**. Institui o Grupo de Trabalho Interministerial para elaboração do Plano Nacional de Fertilizantes. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 2021.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Plano Nacional de Fertilizantes 2022-2050**. Brasília, DF: MAPA, 2022.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços. Secretaria de Comércio Exterior. **Comex Stat: estatísticas de comércio exterior brasileiro**. Brasília, DF: MDIC, 2024. Disponível em: Comex Stat. Acesso em: 27 ago. 2025.

BRASIL. **Decreto nº 4.074, de 4 de janeiro de 2002**. Regulamenta a Lei nº 7.802, de 11 de julho de 1989. Diário Oficial da União, Brasília, 8 jan. 2002. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/decreto/2002/D4074.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/2002/D4074.htm). Acesso em: 3 jan. 2026.

BRASIL. **Decreto nº 6.913, de 23 de julho de 2009**. Acresce dispositivos ao Decreto nº 4.074, de 4 de janeiro de 2002. Diário Oficial da União, Brasília, 24 jul. 2009. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2009/decreto/d6913.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/decreto/d6913.htm). Acesso em: 3 jan. 2026.

BRASIL. **Decreto nº 10.375, de 26 de maio de 2020**. Institui o Programa Nacional de Bioinsumos e o Conselho Estratégico do Programa Nacional de Bioinsumos. Diário Oficial da União, Brasília, 27 maio 2020.

BRASIL. **Decreto nº 10.833, de 7 de outubro de 2021**. Altera o Decreto nº 4.074, de 4 de janeiro de 2002. Diário Oficial da União, Brasília, 8 out. 2021. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2019-2022/2021/decreto/d10833.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/decreto/d10833.htm). Acesso em: 3 jan. 2026.

BRASIL. **Decreto nº 10.991, de 11 de março de 2022**. Institui o Plano Nacional de Fertilizantes 2022-2050 e o Conselho Nacional de Fertilizantes e Nutrição de Plantas. Diário Oficial da União, Brasília, 14 mar. 2022. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2019-2022/2022/Decreto/D10991.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2022/Decreto/D10991.htm). Acesso em: 3 jan. 2026.

BRASIL. **Lei Complementar nº 214, de 16 de janeiro de 2025**. Institui o Imposto sobre Bens e Serviços (IBS), a Contribuição Social sobre Bens e Serviços (CBS) e o Imposto Seletivo (IS).

Diário Oficial da União, Brasília, 16 jan. 2025. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/lcp/lcp214.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/lcp/lcp214.htm).

BRASIL. **Lei nº 6.894, de 16 de dezembro de 1980.** Dispõe sobre a inspeção e fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes, estimulantes ou biofertilizantes, remineralizadores e substratos para plantas. Diário Oficial da União, Brasília, 16 dez. 1980. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/1980-1988/16894.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/1980-1988/16894.htm). Acesso em: 3 jan. 2026.

BRASIL. **Lei nº 7.802, de 11 de julho de 1989.** Dispõe sobre a pesquisa, a experimentação, a produção, a embalagem e rotulagem, o transporte, o armazenamento, a comercialização, a propaganda comercial, a utilização, a importação, a exportação, o destino final dos resíduos e embalagens, o registro, a classificação, o controle, a inspeção e a fiscalização de agrotóxicos, seus componentes e afins. Diário Oficial da União, Brasília, 12 jul. 1989. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/17802.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/17802.htm). Acesso em: 3 jan. 2026.

BRASIL. **Lei nº 10.831, de 23 de dezembro de 2003.** Dispõe sobre a agricultura orgânica e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, 24 dez. 2003. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/2003/110.831.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/2003/110.831.htm). Acesso em: 3 jan. 2026.

BRASIL. **Lei nº 14.785, de 27 de dezembro de 2023.** Dispõe sobre os defensivos agrícolas e afins. Diário Oficial da União, Brasília, 28 dez. 2023.

BRASIL. **Lei nº 15.070, de 23 de dezembro de 2024.** Dispõe sobre a produção, a importação, a exportação, o registro, a comercialização, o uso, a inspeção, a fiscalização, a pesquisa, a experimentação, a embalagem, a rotulagem, a propaganda, o transporte, o armazenamento, as taxas, a prestação de serviços, a destinação de resíduos e embalagens e os incentivos à produção de bioinsumos para uso agrícola, pecuário, aquícola e florestal. Diário Oficial da União, Brasília, 23 dez. 2024. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2023-2026/2024/lei/115070.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/115070.htm).

BRASIL. Companhia Nacional de Abastecimento (Conab). **Boletim Logístico – dezembro/2025.** Brasília: Conab, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/logistica/boletim-logistico/boletim-logistico-dezembro-2025.pdf/view>. Acesso em: 3 jan. 2026.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Bioinsumos como alternativa a fertilizantes químicos em gramíneas:** uma análise sobre os aspectos de inovação do setor. Brasília: MAPA/IICA/ABBI, 2024. 145 p.

BREMMER, J. *et al.* **Impact assessment study on EC 2030 Green Deal targets for sustainable food production:** effects of Farm to Fork and Biodiversity Strategy 2030 at farm, national and EU level. Wageningen: Wageningen Economic Research, 2021.

BRIAND, A. Comparative water pricing analysis: duality formal-informal in a CGE model for Senegal. In: **Input-Output and General Equilibrium: Data, Modeling, and Policy Analysis.** 2004.

BRINK, L.; ORDEN, D.; DATZ, G. BRIC agricultural policies through a WTO lens. **Journal of Agricultural Economics**, v. 64, n. 1, p. 197-216, 2013.

BROOKS, J.; DEWBRE, J. Global trade reforms and income distribution in developing countries. **eJADE: Electronic Journal of Agricultural and Development Economics**, v. 3, n. 1, p. 86-111, 2006.

BROWN, N. Contradictions of value. **Sociology of Health & Illness**, v. 35, p. 97-112, 2013.

BROWN, N.; MACHIN, L.; McLEOD, D. Immunitary bioeconomy. **Social Science & Medicine**, v. 72, p. 1115-1122, 2011.

BUENO, A. F. *et al.* Release of the egg parasitoid *Telenomus podisi* to manage the neotropical brown stink bug, *Euschistus heros*, in soybean production. **Crop Protection**, v. 137, p. 1-7, 2020.

BUGGE, M. M.; HANSEN, T.; KLITKOU, A. What is the bioeconomy? A review of the literature. **Sustainability**, v. 8, n. 7, p. 691, 2016. DOI: 10.3390/su8070691.

BUITER, W. H. 'Crowding out' and the effectiveness of fiscal policy. **Journal of Public Economics**, v. 7, n. 3, p. 309-328, 1977. DOI: 10.1016/0047-2727(77)90052-4.

BURFISHER, M. E. **Introduction to Computable General Equilibrium Models**. 3. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

BURRELL, Q. L. The Bradford distribution and the Gini index. **Scientometrics**, v. 21, p. 181-194, 1991.

BUSH, V. **Science: the endless frontier**. Washington, DC: United States Government Printing Office, 1945.

CALIGARIS, B. S. A.; VIEIRA FILHO, J. E. R.; PAIVA, C. A. D. O. **Bioinsumos e solubilização biológica de fosfato: ganhos de produtividade e redução de custos**. Brasília: IPEA, 2025. (Texto para Discussão, n. 3151).

CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Política nacional de bioinsumos: marco regulatório e implicações tributárias**. Brasília: Consultoria Legislativa, 2020.

CARDOSO, G.; FREIRE, D.; DOMINGUES, E. P. Assessing the impacts of Brazil's expenditure ceiling with a multiple-household CGE model. **Review of Development Economics**, v. 29, n. 1, 2025.

CARDOSO, D. F.; DOMINGUES, E. P.; AFONSO, L. E.; CARDOSO, G. S. Impactos econômicos da redução de aposentadorias e benefícios para a economia brasileira. **Pesquisa e Planejamento Econômico**, 2023.

CARDOSO, D. F. "Capital e trabalho no Brasil no século XXI: O impacto de políticas de transferência e de tributação sobre desigualdade, consumo e estrutura produtiva." 2020. Disponível em: <http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/20381>. Acesso em 27 de janeiro de 2023.

CARVALHEIRO, F.; DUARTE, L. C.; GIRIÓ, F. M. Hemicellulose biorefineries. **Journal of Scientific & Industrial Research**, v. 67, p. 849-864, 2008.

CARVALHO, A. A.; ALVES, J. E. D. Explorando o consumo das famílias brasileiras e sua interface com o ciclo de vida e gênero. **Oikos**, v. 23, p. 6-29, 2012.

CARVALHO, A. A.; ALVES, J. E. D. Padrões de consumo dos arranjos familiares e das pessoas que moram sozinhas no Brasil e em Minas Gerais: uma análise de gênero e renda. In: SEMINÁRIO SOBRE ECONOMIA MINEIRA, 14., 2010, Diamantina. **Anais [...]**. Diamantina, 2010.

CARVALHO, M. M.; MAGALHÃES, A. S.; DOMINGUES, E. P. **Efetividade econômica, social e ambiental da precificação de carbono na economia brasileira**. 2022. Tese (Doutorado) – Cedeplar, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2022.

CAVALCANTI, M. A. F. H.; VEREDA, L. **Multiplicadores dos gastos públicos**: estimativas a partir de um modelo DSGE para o Brasil. Brasília: IPEA, 2014. (Carta de Conjuntura, n. 25).

CGFERT – CONSELHO NACIONAL DE FERTILIZANTES. **Relatório de acompanhamento do PNF – 2023**. Brasília: MAPA, 2023.

CHAKRABORTY, P.; CHOPRA, A.; CONTRACTOR, L. **The equilibrium impact of agricultural support prices and input subsidies**. STEG Working Paper, 2025.

CHALISE, S.; NARANPANAWA, A. Climate change adaptation in agriculture: A computable general equilibrium analysis of land-use change in Nepal. **Land Use Policy**, v. 59, p. 241-250, 2016. DOI: 10.1016/j.landusepol.2016.09.007.

CHEN, H. D.; GOTTWEIS, H. Stem cell treatments in China. **Bioethics**, v. 27, p. 194-207, 2013.

CIOT, M.-G. Implementation perspectives for the European Green Deal in Central and Eastern Europe. **Sustainability**, v. 14, n. 7, art. 3947, 2022.

CLORA, F.; CORONG, E.; YU, W. **The European Green Deal**: understanding the relevance of domestic climate policy details, CBAM's embedded emissions and exporters' carbon price rebates. 2024.

COCKBURN, J.; CORONG, E.; CORORATON, C. Poverty effects of the Philippines' tariff reduction program: insights from a computable general equilibrium analysis. **Asian Economic Journal**, v. 22, n. 3, p. 289-319, 2008.

COELHO, B. Análise da carga tributária do agronegócio brasileiro. **Revista de Política Agrícola**, v. 27, n. 4, p. 5-22, 2018.

COENEN, G. *et al.* Effects of fiscal stimulus in structural models. **American Economic Journal: Macroeconomics**, v. 4, n. 1, p. 22-68, 2012.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento do mercado de fertilizantes**. Brasília: Conab, 2022.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Portal de Informações Agropecuárias**: Produtos 360°. Disponível em: <https://portaldeinformacoes.conab.gov.br/produtos-360.html>.

CONWAY, G. R.; BARBIER, E. B. **After the Green Revolution: sustainable agriculture for development**. London: Earthscan, 1988

COOKE, P. Global bioregional networks. **European Planning Studies**, v. 14, p. 1265-1285, 2006.

COOKE, P. **Growth Cultures: the global bioeconomy and its bioregions**. Abingdon: Routledge, 2007a.

COOKE, P. Regional advantage and policy platforms. **European Planning Studies**, v. 15, p. 179-194, 2007b.

COOKE, P. The economic geography of knowledge flow. **Tijdschrift voor Economische en Sociale Geografie**, v. 100, p. 332-347, 2009.

CORDEN, W. M. Booming sector and Dutch disease economics: survey and consolidation. **Oxford Economic Papers**, v. 36, n. 3, p. 359-380, 1984.

CORDEN, W. M.; NEARY, J. P. Booming sector and de-industrialisation in a small open economy. **The Economic Journal**, v. 92, n. 368, p. 825-848, 1982.

CORONG, E. L. **Tariff elimination, gender and poverty in the Philippines: A computable general equilibrium (CGE) microsimulation analysis**. 2014. Tese de Doutorado. Monash University.

CORORATON, C. B. **Structural adjustment policy experiments: the use of Philippine CGE models**. 1994. Disponível em: <https://hdl.handle.net/10419/187253>. Acesso em julho 2022.

CORTIGNANI, R.; BUTTINELLI, R.; DONO, G. Farm to Fork strategy and restrictions on the use of chemical inputs: impacts on the various types of farming and territories of Italy. **Science of The Total Environment**, v. 810, art. 152259, 2022.

COUTINHO, J.; ARROBAS, M.; RODRIGUES, O. Effect of composted sewage sludge amendment on soil nitrogen and phosphorus availability. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 28, n. 19-20, p. 1845-1857, 1997.

CROPLIFE BRASIL. **Bioinsumos na agricultura: benefícios, aplicações e desafios**. São Paulo: CropLife Brasil, 2025.

CROPLIFE BRASIL. **CropData**. Disponível em: <https://croplifebrasil.org/cropdata/>. Acesso em: 26 nov. 2025.

CROPLIFE BRASIL. **Mercado de bioinsumos no Brasil: dados da safra 2024/2025**. São Paulo: CropLife Brasil, 2025. Disponível em: <https://cropdata.croplifebrasil.org>. Acesso em: 5 abr. 2026.

CROPLIFE BRASIL; FGV. **Estudo CropLife-FGV sobre bioinsumos agrícolas: mercado global e perspectivas para o Brasil**. São Paulo: CropLife Brasil; Fundação Getulio Vargas, 2024.

CRUZ, G. M. O que são bioinsumos e qual o seu potencial para o agro brasileiro? Agro in Data. INSPER. 2025. Disponível em: <https://agro.insper.edu.br/agro-in-data/artigos/o-que-sao-bioinsumos-e-qual-o-seu-potencial-para-o-agro-brasileiro>. Acesso em: 01 jun. 2026.

CURY, S.; PEDROZO, E.; COELHO, A. M. Cash transfer policies, taxation and the fall in inequality in Brazil: an integrated microsimulation-CGE analysis. **International Journal of Microsimulation**, v. 9, n. 1, p. 1-29, 2016.

CZEKAŁA, Wojciech; DROZDOWSKI, Jędrzej; ŁABIAK, Piotr. Modern technologies for waste management: a review. **Applied Sciences**, v. 13, n. 15, p. 8847, 2023.

DAVIES, G. Geographies of organ transplantation. **Transactions of the Institute of British Geographers**, v. 31, p. 257-271, 2006.

DE HOYOS, R.E; MEDVEDEV, D. Poverty Effects of Higher Food Prices: A Global Perspective. **Review of Development Economics**, 15: 387-402. 2011. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9361.2011.00615.x>

DE NEGRI, F. O.; CAVALCANTE, L. R. O. **Produtividade no Brasil: desempenho e determinantes**. Brasília: IPEA, 2014.

DERVIS, K.; DE MELO, J.; ROBINSON, S. **General equilibrium models for development policy**. Cambridge: Cambridge University Press, 1982.

DEVARAJAN, S.; ROBINSON, S. The impact of computable general equilibrium models on policy. In: **The Impact of Economics on Policy**. Washington, DC: World Bank, 2002.

DEVARAJAN, S.; ROBINSON, S. The Influence of Computable General Equilibrium Models on Policy. **Frontiers in Applied General Equilibrium Modeling**, p. 402-428, 2005. DOI: 10.1017/cbo9780511614330.016.

DEVARAJAN, S.; SWAROOP, V.; ZOU, H. The composition of public expenditure and economic growth. **Journal of Monetary Economics**, v. 37, n. 2, p. 313-344, 1996.

DEWBRE, J.; BROOKS, J. Réforme des politiques agricoles, rendement des facteurs et bien-être des ménages. In: ORGANISATION DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUE. **Dynamiser les échanges: les enjeux du développement dans le système commercial multilatéral**. Paris: OCDE, 2006. p. 219.

DISSANAYAKE, S; ASAFU-ADJAYE, J; MAHADEVA, R. Addressing climate change cause and effect on land cover and land use in South Asia. **Land Use Policy**, v. 67, p. 352-366, 2017.

DIXON, P. B.; PARMENTER, B. Chapter 1 Computable general equilibrium modelling for policy analysis and forecasting. **Handbook of Computational Economics**, p. 3-85, 1996. DOI: 10.1016/s1574-0021(96)01003-9.

DIXON, P. B.; PARMENTER, B. R.; SUTTON, J.; VINCENT, D. P. **ORANI: a multisectoral model of the Australian economy**. Amsterdam: North-Holland, 1982.

DIXON, P. B.; RIMMER, M. T. **Dynamic General Equilibrium Modelling for Forecasting and Policy**: a practical guide and documentation of MONASH. Amsterdam: North-Holland, 2002.

DIXON, P. B.; RIMMER, M. T. You can't have a CGE recession without excess capacity. **Economic Modelling**, v. 28, n. 1-2, p. 602-613, 2011.

DIXON, P. B.; RIMMER, M.; TRAN, N. Creating a disaggregated CGE model for trade policy analysis: GTAP-MVH. **Foreign Trade Review**, v. 55, n. 1, p. 42-79, 2020.

DOEPKE, M.; SCHNEIDER, M. Inflation and the redistribution of nominal wealth. **Journal of Political Economy**, v. 114, n. 6, p. 1069-1097, 2006.

DOMINGUES, E. P. *et al.* **Repercussões setoriais e regionais da crise econômica de 2009 no Brasil: simulações em um modelo de equilíbrio geral computável de dinâmica recursiva**. Texto para discussão n. 390. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, Centro de Desenvolvimento e Planejamento Regional, 2010. 32 p.

DOMINGUES, E. P. Dimensão regional e setorial da integração brasileira na Área de Livre Comércio das Américas. 2002. **Tese de Doutorado**. Universidade de São Paulo.

DONG, X. Distributional welfare effects of agricultural subsidy reform in rural China using macro-micro simulation. **Humanities and Social Sciences Communications**, 2026.

DORNBUSCH, R. **Open economy macroeconomics**. New York: Basic Books, 1980.

DUCHESNE, L. C.; WETZEL, S. The bioeconomy and the forestry sector. **The Forestry Chronicle**, v. 79, p. 860-864, 2003.

DUSSELIER, M. *et al.* Lactic acid as a platform chemical. **Energy & Environmental Science**, v. 6, p. 1415-1442, 2013.

EASTERLY, W.; FISCHER, S. Inflation and the poor. **Journal of Money, Credit and Banking**, v. 33, n. 2, p. 160-178, 2001.

ELSHENNAWY, A. Is there a triple dividend effect from a tax on fertilizer use? A computable general equilibrium approach. In: **Economic Research Forum Working Papers**. 2011.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Bioeconomia**: a ciência do futuro no presente. Brasília: Embrapa, 2022a.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Bioinsumos**: tendências e desafios no Brasil. Brasília: Embrapa, 2024.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Portfólio de Insumos Biológicos**. Brasília: Embrapa, 2022b.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Técnicas de inoculação de bactérias aumentam produtividade da soja**. Brasília: Embrapa, 2019. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-noticias/-/noticia/42282400/tecnicas-de-inoculacao-de-bacterias-aumentam-produtividade-da-soja>. Acesso em: 16 nov. 2025.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Visão 2030: o futuro da agricultura brasileira**. Brasília: Embrapa, 2018.

ENGEL, E. Die Productions- und Consumtionsverhältnisse des Königreichs Sachsen. **Zeitschrift des Statistischen Büreaus des Königlich Sächsischen Ministeriums des Innern**, v. 8, p. 1-54, 1857.

EUROPEAN COMMISSION. **Innovating for Sustainable Growth: a bioeconomy for Europe**. Brussels: European Commission, 2012.

EUROPEAN UNION. **Regulamento (CEE) nº 2092/91, de 24 de junho de 1991**. Relativo ao modo de produção biológico de produtos agrícolas. Jornal Oficial das Comunidades Europeias, L 198, p. 1-15, 22 jul. 1991. Disponível em: <http://data.europa.eu/eli/reg/1991/2092/oj>. Acesso em: 3 jan. 2026.

ESCALANTE, J. et al. Pyrolysis of lignocellulosic, algal, plastic, and other biomass wastes for biofuel production and circular bioeconomy: A review of thermogravimetric analysis (TGA) approach. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 169, p. 112914, 2022.

FANG, Y. Visualizing the structure and the evolving of digital medicine: a scientometrics review. **Scientometrics**, v. 105, p. 5-21, 2015.

FANNIN, M. Endometrial stem cell storage. **Body & Society**, v. 19, p. 32-60, 2013.

FANZO, J. C.; GRAZIOSE, M. M. Developing capacity in nutrition. In: **Nutrition and health in a developing world**. Totowa: Humana Press, 2017. p. 67-88.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS- FAO. **The 10 Elements of Agroecology**. Rome: FAO, 2019.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **The state of food insecurity in the world 2005**. Rome: FAO, 2005. ISBN 92-5-105384-7.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Approches agroécologiques et autres approches novatrices pour une agriculture durable et des systèmes alimentaires propres à améliorer la sécurité alimentaire et la nutrition**. Rome: FAO, 2021. Disponível em: <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/a05413fr>

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **World food and agriculture: statistical yearbook 2023**. Rome: FAO, 2023. DOI: 10.4060/cc8166en. Disponível em: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/28cfd24e-81a9-4ebc-b2b5-4095fe5b1dab/content/cc8166en.html>. Acesso em: 27 ago. 2024.

FARIA, W. R. **Modelagem e avaliação de fenômenos relacionados ao uso da terra no Brasil**. 2012. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

FARIA, W. R.; HADDAD, E. A. Modelagem do uso da Terra e Efeitos de Mudanças na Produtividade Agrícola entre 2008 e 2015. **Estudos Econômicos (São Paulo)**, v. 49, n. 1, p. 65-103, 2019.

FEDER, G.; JUST, R. E.; ZILBERMAN, D. Adoption of agricultural innovations in developing countries: a survey. **Economic Development and Cultural Change**, v. 33, n. 2, p. 255-298, 1985.

FERRARA, A.; FERRONI, R. The effect of food price upsurges on income inequality: the richest win and the poorest lose. **World Development**, v. 189, art. 106876, 2025.

FERREIRA FILHO, J. B. S.; HORRIDGE, M. Endogenous land use and supply, and food security in Brazil. In: ANNUAL CONFERENCE ON GLOBAL ECONOMIC ANALYSIS, 15., 2012, Geneva. **Proceedings** [...]. Geneva, 2012.

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

FERREIRA FILHO, J. B. S.; HORRIDGE, M. The Doha Development Agenda and Brazil: distributional impacts. **Review of Agricultural Economics**, v. 28, n. 3, p. 362-369, 2006.

FERREIRA, P. C.; ISSLER, J. V.; PESSOA, S. A. **On the nature of income inequality across nations**. Rio de Janeiro: FGV, [s.d.]. Disponível em: <https://hdl.handle.net/10438/791>.

FGV; VARGAS, D.; PINTO, T.; LIMA, C. **Transição verde: bioeconomia e conversão do verde em valor**. Brasília: FGV, 2024.

FIORINI, A. C. O. *et al.* Sustainable aviation fuels must control induced land use change: an integrated assessment modelling exercise for Brazil. **Environmental Research Letters**, v. 18, n. 1, art. 014036, 2023.

FITZPATRICK, M. *et al.* Lignocellulosic materials and biorefineries. **Bioresource Technology**, v. 101, p. 8915-8922, 2010.

FMI – FUNDO MONETÁRIO INTERNACIONAL. **Agricultural producer subsidies: navigating challenges and policy considerations**. Washington, DC: IMF, 2024. (IMF Notes, 2024/002).

FOCHEZATTO, A. Modelos de equilíbrio geral aplicados na análise de políticas fiscais: uma revisão da literatura. **Análise – Revista de Administração da PUCRS**, v. 16, n. 1, 2005.

FOLEY, J. A. Can we feed the world and sustain the planet? **Scientific American**, v. 305, n. 5, p. 60-65, 2011.

FOLEY, J. A. *et al.* Solutions for a cultivated planet. **Nature**, v. 478, p. 337-342, 2011.

FRANDSEN, S. E.; HANSEN, J. V.; TRIER, P. A CGE model for Denmark applied to CO2 targets and GATT liberalizations. In: BRADLEY, P.; PETERS, I. (ed.). **Modelling the Economy and the Environment**. Berlin: Springer, 1996. p. 62-76. DOI: 10.1007/978-3-642-61128-5\_4.

FREEMAN, L. C. A set of measures of centrality based on betweenness. **Sociometry**, v. 40, p. 35-41, 1977.

FRIEDMAN, B. M. Crowding out or crowding in? Economic consequences of financing government deficits. **Brookings Papers on Economic Activity**, n. 3, p. 593-641, 1978.

FRIEDRICH, K. *et al.* International regulatory situation of pesticides authorized for use in Brazil: potential for damage to health and environmental impacts. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 37, art. e00061820, 2021.

FUGLIE, K. O. Productivity growth and technology capital in the global agricultural economy. In: FUGLIE, K. O.; WANG, S. L.; BALL, V. E. (ed.). **Productivity Growth in Agriculture: an international perspective**. Wallingford: CAB International, 2012. p. 335-368.

GALÍ, J. Technology, employment, and the business cycle: do technology shocks explain aggregate fluctuations? **American Economic Review**, v. 89, n. 1, p. 249-271, 1999. DOI: 10.1257/aer.89.1.249.

GARNETT, T. *et al.* Sustainable intensification in agriculture: premises and policies. **Science**, v. 341, n. 6141, p. 33-34, 2013.

GASQUES, J. G. *et al.* **Produtividade da agricultura brasileira: desempenho recente**. Brasília: IPEA, 2022.

GASQUES, J. G.; BASTOS, E. T.; VALDES, C.; BACCHI, M. R. P. Produtividade da agricultura brasileira e os efeitos de algumas políticas. **Revista de Política Agrícola**, v. 19, n. 3, p. 83-92, 2010.

GAUTAM, M. Agricultural subsidies: resurging interest in a perennial debate. **Indian Journal of Agricultural Economics**, v. 70, n. 1, p. 83-105, 2015.

GEARY, R. C. A note on 'A constant utility index of the cost of living'. **Review of Economic Studies**, v. 18, n. 1, p. 65-66, 1950.

GEORGESCU-ROEGEN, N. **The entropy law and the economic process**. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1971.

GHOSH, M.; ROY, S. **Computable General Equilibrium Models for Trade Policy Analysis in Developing Countries**. New York: Springer, 2019.

GODFRAY, H. C. J. *et al.* Food security: the challenge of feeding 9 billion people. **Science**, v. 327, n. 5967, p. 812-818, 2010.

GOLDSTEIN, J. S.; HUANG, X.; AKAN, B. Energy in the world economy, 1950-1992. **International Studies Quarterly**, v. 41, n. 2, p. 241-266, 1997.

GOMES, D. V.; AMORIM, A. F. P.; NERI, J.; PIRES, R. C. S.; BISPO, E. R.; LEITE, I. C. S. Recurso para tratamento do esgoto sanitário rural com o uso do biodigestor anaeróbico modelo Embrapa: revisão. **Epitaya E-books**, v. 1, n. 122, p. 51-60, 2025.

GONZAGA, G.; CORSEUIL, C. H. Emprego industrial no Brasil: análise de curto e longo prazos. **Revista Brasileira de Economia**, v. 55, p. 467-491, 2001.

GOULDER, L. H., LONG, X., LU, J., MORGENSTERN, R. D. **China's Unconventional Nationwide CO<sub>2</sub> Emissions Trading System: The Wide-Ranging Impacts of an Implicit Output Subsidy** (No. w26537). National Bureau of Economic Research. 2019.

GRAHAM, R. L. *et al.* Current and potential US corn stover supplies. **Agronomy Journal**, v. 99, p. 1-11, 2007.

GREPPERUD, S; WIIG, H; AUNE, F. R. **Maize trade liberalization vs. fertilizer subsidies in Tanzania: A CGE model analysis with endogenous soil fertility**. Discussion Papers, 1999.

GUARENGHI, M. M. *et al.* Areas available for the potential sustainable expansion of soy in Brazil: a geospatial assessment using the SAFmaps database. **Remote Sensing**, v. 14, n. 7, art. 1628, 2022.

GUILHOTO, J. **Um modelo computável de equilíbrio geral para planejamento e análise de políticas agrícolas (PAPA) na economia brasileira**. 1995. Disponível em: <https://papers.ssrn.com/abstract=2420141>.

GUILHOTO, J.; HASEGAWA, M. M.; LOPES, R. L. **A estrutura teórica do modelo inter-regional para a economia brasileira – MIBRA**. 2002. Disponível em: <https://papers.ssrn.com/abstract=2412209>.

GUPTA, J. A. Reproductive biocrossings. **International Journal of Feminist Approaches to Bioethics**, v. 5, p. 25-51, 2012.

HAAVELMO, T. Multiplier effects of a balanced budget. **Econometrica**, v. 13, n. 4, p. 311-318, 1945.

HADDAD, E. A. **Regional Inequality and Structural Changes: lessons from the Brazilian experience**. London: Routledge, 1999.

HADDAD, E. A. **Retornos crescentes, custo de transporte e crescimento regional**. 2004. Tese (Livre-Docência) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

HADDAD, E. A. *et al.* Assessing the ex-ante economic impacts of transportation infrastructure policies in Brazil. **Journal of Development Effectiveness**, v. 3, n. 1, p. 44-61, 2011.

HAIMES, E. IVF patients' accounts. **Social Science & Medicine**, v. 86, p. 45-51, 2013.

HANSEN, T.; WINTHER, L. Innovation, regional development and relations between high- and low-tech industries. **European Urban and Regional Studies**, v. 18, p. 321-339, 2011.

HARDING, T.; VENABLES, A. J. The direct and indirect effects of natural resource windfalls. **Journal of International Economics**, v. 103, p. 68-85, 2016.

HARRISON, W. J.; HORRIDGE, J. M.; PEARSON, K. R.; WITTEWER, G. A practical method for explicitly modeling quotas and other complementarities. **Computational Economics**, v. 22, n. 2, p. 157-176, 2003.

HAYAMI, Y.; RUTTAN, V. W. **Agricultural development**. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 1985.

- HAYASHI, F. Tobin's marginal q and average q: a neoclassical interpretation. **Econometrica**, v. 50, n. 1, p. 213-224, 1982.
- HEADEY, D.; FAN, S. Anatomy of a crisis: the causes and consequences of surging food prices. **Agricultural Economics**, v. 39, s1, p. 375-391, 2008.
- HEADLEY, J. C. Estimating the productivity of agricultural pesticides. **American Journal of Agricultural Economics**, v. 50, n. 1, p. 13-23, 1968. DOI: 10.2307/1237868.
- HELFAND, G. E.; HOUSE, B. W. Regulating nonpoint source pollution under heterogeneous conditions. **American Journal of Agricultural Economics**, v. 77, n. 4, p. 1024-1032, 1995.
- HELFAND, S. M.; MAGALHÃES, M. M.; RADA, N. E. **Brazil's agricultural total factor productivity growth by farm size**. Washington, DC: IDB, 2015. (IDB Working Paper Series, IDB-WP-609).
- HENNING, C. *et al.* **Economic and environmental impacts of the Green Deal on the agricultural economy**: a simulation study of the impact of the F2F-Strategy on production, trade, welfare and the environment based on the CAPRI-Model. Kiel: University of Kiel; EuroCare Bonn, 2021.
- HERTEL, T. W. **Global trade analysis**: modeling and applications. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- HERTEL, T. W.; TSIGAS, M. E. Structure of GTAP. In: HERTEL, T. W. (ed.). **Global trade analysis**: modeling and applications. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- HERTEL, T. W.; WINTERS, L. A. (ed.). **Poverty & the WTO**: impacts of the Doha Development Agenda. Washington, DC: World Bank; Palgrave Macmillan, 2006.
- HICKMAN, C. *et al.* Climate anxiety in children and young people. **The Lancet Planetary Health**, v. 5, n. 12, p. e863-e873, 2021.
- HILGARTNER, S. Making the bioeconomy measurable. **BioSocieties**, v. 2, p. 382-386, 2007.
- HLPE – HIGH LEVEL PANEL OF EXPERTS. **Agroecological and other innovative approaches for sustainable agriculture and food systems that enhance food security and nutrition**. Rome: FAO, 2019.
- HOEYER, K. Tradable body parts. **BioSocieties**, v. 4, p. 239-256, 2009.
- HOFFMANN, R. Estimativas das elasticidades-renda de várias categorias de despesa e de consumo, especialmente alimentos, no Brasil, com base na POF de 2008-2009. **Economia Aplicada**, v. 57, n. 2, p. 49-57, 2010.
- HOGARTH, S.; SALTER, B. Regenerative medicine in Europe. **Regenerative Medicine**, v. 5, p. 971-985, 2010.
- HOLDEN, S; LOFGREN, H; SHIFERAW, B. Economic reforms and soil degradation in the Ethiopian highlands: a micro CGE model with transaction costs. In: **International Conference on Policy Modeling (EcoMod2005) June**. 2005.

HORLINGS, L. G.; MARSDEN, T. K. The new rural paradigm. **European Urban and Regional Studies**, v. 21, p. 4-20, 2014.

HORN, S. J. *et al.* Novel enzymes for the degradation of cellulose. **Biotechnology for Biofuels**, 2012.

HORRIDGE, J. M.; PARMENTER, B. R.; PEARSON, K. R. **ORANI-G**: a general equilibrium model of the Australian economy. Melbourne: Monash University, 1998.

HORRIDGE, M. **ORANI-G**: a general equilibrium model of the Australian economy. Melbourne: CoPS, 2000.

HORRIDGE, M. **ORANIGRD**: a recursive dynamic version of ORANIG. Melbourne: CoPS, 2002.

HORRIDGE, M. The TERM model and its database. In: WITTWER, G. (ed.). **Economic Modeling of Water**: the Australian CGE experience. Dordrecht: Springer, 2011. p. 13-35.

HORRIDGE, M.; MADDEN, J.; WITTWER, G. The impact of the 2002-2003 drought on Australia. **Journal of Policy Modeling**, v. 27, n. 3, p. 285-308, 2005.

HOTELLING, H. The economics of exhaustible resources. **Journal of Political Economy**, v. 39, n. 2, p. 137-175, 1931.

HSIEH, C. R.; LOFGREN, H. Biopharmaceutical innovation. **Australian Health Review**, v. 33, p. 245-257, 2009.

HSIANG, Solomon. Climate econometrics. **Annual Review of Resource Economics**, v. 8, p. 43-75, 2016.

HUNGRIA, M. *et al.* Nitrogen nutrition of soybean in Brazil: contributions of biological N<sub>2</sub> fixation and of N fertilizer to grain yield. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 86, p. 927-939, 2006.

HUNGRIA, M.; MENDES, I. C. Nitrogen fixation with soybean: the perfect symbiosis? In: DE BRUIJN, F. J. (ed.). **Biological Nitrogen Fixation**. Hoboken: Wiley, 2015. p. 1009-1023.

HUNGRIA, M.; MENDES, I. C.; MERCANTE, F. M. **A fixação biológica do nitrogênio como tecnologia de baixa emissão de carbono para feijoeiro e soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2013.

HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M. A.; ARAUJO, R. S. Co-inoculation of soybeans and common beans with rhizobia and azospirilla: strategies to improve sustainability. **Biology and Fertility of Soils**, v. 49, n. 7, p. 791-801, 2013.

HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M. A.; ARAUJO, R. S. Soybean seed co-inoculation with Bradyrhizobium spp. and Azospirillum brasilense: a new biotechnological tool to improve yield and sustainability. **American Journal of Plant Sciences**, v. 6, p. 811-817, 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Sistema de contas nacionais**: Brasil: 2015. Rio de Janeiro: IBGE, 2017. (Contas Nacionais, n. 57). Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/>. Acesso em: 27 ago. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS - IBAMA. **Instrução Normativa nº 7, de 15 de dezembro de 1999**. Diário Oficial da União, Brasília, 16 dez. 1999. Disponível em: <https://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/IBAMA/IN0007-151299.PDF>. Acesso em: 3 jan. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS - IBAMA. **Relatórios de comercialização de agrotóxicos**. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/quimicos-e-biologicos/agrotoxicos/relatorios-de-comercializacao-de-agrotoxicos#boletinsanuais>. Acesso em: 6 ago. 2025.

INSAPER AGRO. **O que são bioinsumos e qual o seu potencial para o agro brasileiro?** São Paulo: Insaper Agro Global, 2025.

INSAPER AGRO GLOBAL. **Qual é a dependência do agro brasileiro das importações de fertilizantes?** Agro in Data. São Paulo: Insaper, 2025. Disponível em: <https://agro.insaper.edu.br/agro-in-data/artigos/qual-e-a-dependencia-do-agro-brasileiro-das-importacoes-de-fertilizantes>. Acesso em: 25 ago. 2026.

IPEA – INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **A inserção dos bioinsumos na agricultura brasileira**. Brasília: IPEA, 2022a. (Nota Técnica).

IPEA – INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Impactos da guerra no mercado de fertilizantes**. Brasília: IPEA, 2022b. (Nota Técnica, n. 13).

IVANIC, M.; MARTIN, W. Implications of higher global food prices for poverty in low-income countries. **Agricultural Economics**, v. 39, s1, p. 405-416, 2008.

JIMÉNEZ-TOBÓN, D.; VAHOS-POSADA, D. A.; GALO-MOLINA, J. J.; RÍOS-OSORIO, L. A. Efecto del uso de biofertilizantes sobre la productividad agrícola: revisión sistemática. **Hechos Microbiológicos**, v. 13, n. 2, 2022.

JOHANSEN, L. A multi-sectoral study of economic growth. Ams terdam: North-Holland, 1960.

JOHNSTON, B. F.; MELLOR, J. W. The role of agriculture in economic development. **The American Economic Review**, v. 51, n. 4, p. 566-593, 1961.

JOHNSTON, F. L.; MARTINS, M. M. V.; PEREIRA, T. F. L. S. Segurança alimentar e produtividade agrícola: uma análise de EGC. **Revista Econômica do Nordeste**, v. 54, n. 1, p. 87-102, 2023.

JORGENSON, D. W. Capital theory and investment behavior. **American Economic Review**, v. 53, n. 2, p. 247-259, 1963.

JUST, R. E.; HUETH, D. L. Welfare measures in a multimarket framework. **American Economic Review**, v. 69, n. 5, p. 947-954, 1979.

KATTELMANN, F. *et al.* How to reach the new Green Deal targets: analysing the necessary burden sharing within the EU using a multi-model approach. **Energies**, v. 14, n. 23, art. 7971, 2021.

KEARNES, M. Performing synthetic worlds. **Science and Public Policy**, v. 40, p. 453-465, 2013.

KEEGAN, D. *et al.* Cascading use of biomass. **Biofuels, Bioproducts & Biorefining**, v. 7, p. 193-206, 2013.

KENT, J. The fetal tissue economy. **Social Science & Medicine**, v. 67, p. 1747-1756, 2008.

KENYA NATIONAL BUREAU OF STATISTICS. **The 2007 Kenya Population and Housing Census: Household and family dynamics**. Kenya National Bureau of Statistics, 2007.

KHAN, N. *et al.* Overview of biofertilizers in crop production and stress management for sustainable agriculture. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, art. 930340, 2022.

KICHERER, A. *et al.* Eco-efficiency: combining life cycle assessment and life cycle costs via normalization. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 12, n. 7, p. 537-543, 2007.

KIM, K.; BEVIS, L. Soil fertility and poverty in developing countries. **Choices**, v. 34, n. 2, p. 1-8, 2019.

KINKPE, Agossoussi Thierry; LUCKMANN, Jonas; GRETHE, Harald. Welfare effects of food-processing development in agriculture-based economies: a CGE analysis for Benin. **Applied Economics**, v. 56, n. 57, p. 7825-7844, 2024.

KLEINSCHMIT, D. *et al.* Shades of green. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 29, p. 402-410, 2014.

KLEIN, L. R.; RUBIN, H. A constant-utility index of the cost of living. **The Review of Economic Studies**, v. 15, n. 2, p. 84-87, 1947. DOI: 10.2307/2295996.

KNOX, A. D. The acceleration principle and the theory of investment: a survey. **Economica**, v. 19, n. 75, p. 269-297, 1952.

KÖHLER, H.-R.; TRIEBSKORN, R. Wildlife ecotoxicology of pesticides. **Science**, v. 341, p. 759-765, 2013.

KHONJE, M., NYONDO, C., MANGISONI, J.H., RICKER-GILBERT, J., BURKE, W.J., CHADZA, W. *et al.* Does subsidizing legume seeds improve farm productivity and nutrition in Malawi? **Working or Discussion Paper**. 2021. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.319865>

KUIPER, M.; VAN ZEIST, W.-J. **Can a Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) reduce negative social and environmental international spillovers from EU food consumption?** 2023.

KUMAR, R.; KUMAR, A.; GUPTA, M. K.; YADAV, J.; JAIN, A. Solar tree-based water pumping for assured irrigation in sustainable Indian agriculture environment. **Sustainable Production and consumption**, 33, 15-27. 2022

LAL, R. Restoring soil quality to mitigate soil degradation. **Sustainability**, v. 7, n. 5, p. 5875-5895, 2015.

LÁZARI, N. C.; MAGALHÃES, M. M. Crescimento da PTF segundo tamanho de estabelecimentos rurais na região Sudeste, de 1985 a 2006. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 57, n. 2, p. 198-214, 2019.

LEE, S. H. *et al.* Ionic liquid-mediated selective extraction of lignin from wood. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 102, p. 1368-1376, 2009.

LEEPER, E. M. Equilibria under active and passive monetary and fiscal policies. **Journal of Monetary Economics**, v. 27, n. 1, p. 129-147, 1991. DOI: 10.1016/0304-3932(91)90007-B.

LEEPER, E. M.; PLANTE, M.; TRAUM, N. Dynamics of fiscal financing in the United States. **Journal of Econometrics**, v. 156, n. 2, p. 304-321, 2010.

LEVIDOW, L.; BIRCH, K.; PAPAIOANNOU, T. Divergent paradigms of European agro-food innovation: the knowledge-based bio-economy (KBBE) as an R&D agenda. **Science, Technology & Human Values**, v. 38, p. 94-125, 2013.

LI, C. Z.; WANG, Q.; ZHAO, Z. K. Acid in ionic liquid: an efficient system. **Green Chemistry**, v. 10, p. 177-182, 2008.

LIMA, A. L. R. *et al.* Recursos e desempenho de propriedades cafezeiras de Minas Gerais. **Revista de Política e Planejamento Regional**, 2017.

LINNEMANN, L.; SCHABERT, A. Fiscal policy in the new neoclassical synthesis. **Journal of Money, Credit and Banking**, v. 35, n. 6, p. 911-929, 2003.

LOFGREN, H.; HARRIS, R. L.; ROBINSON, S. **A standard computable general equilibrium (CGE) model in GAMS**. Washington, DC: International Food Policy Research Institute, 2002.

LOPES-FERREIRA, M. *et al.* Impact of pesticides on human health in the last six years in Brazil. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 19, n. 6, art. 3198, 2022.

LOW, S. A.; ISSERMAN, A. M. Ethanol and the local economy. **Economic Development Quarterly**, v. 23, p. 71-88, 2009.

LUNDAHL, M. 'Efficient but poor': Schultz' theory of traditional agriculture. **Scandinavian Economic History Review**, v. 35, p. 108-129, 1987.

LUPORINI, V.; ALVES, J. Investimento privado: uma análise empírica para o Brasil. **Economia e Sociedade**, v. 19, n. 3, p. 449-475, 2010.

MACHADO, P. G.; CUNHA, M. P.; WALTER, A.; FAAIJ, A.; GUILHOTO, J. J. M. Biobased economy for Brazil: impacts and strategies for maximizing socioeconomic benefits. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 139, art. 110573, 2021.

MAGALHÃES, A. S. **Economia de baixo carbono no Brasil**: alternativas de políticas e custos de redução de emissões de gases de efeito estufa. 2013. 293 f. Tese (Doutorado em Economia) – Centro de Desenvolvimento e Planejamento Regional, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

MAGALHÃES, A. S.; DOMINGUES, E. P.; CIASCA, B. S. **Uso da água no Brasil**: simulações em EGC. Belo Horizonte: UFMG/Cedeplar, 2019.

MALEK, Ž.; VERBURG, P. H. Mapping global patterns of land use decision-making. **Global Environmental Change**, v. 65, p. 102170, 2020. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2020.102170.

MANEA, E. E.; BUMBAC, C.; DINU, L. R.; BUMBAC, M.; NICOLESCU, C. M. Composting as a sustainable solution for organic solid waste management: current practices and potential improvements. **Sustainability**, v. 16, n. 15, art. 6329, 2024.

MARKET RESEARCH FUTURE (MRFR). **Organic fertilizers market size & growth analysis, 2025–2035**. Pune: MRFR, 2026. Disponível em: <https://www.marketresearchfuture.com>. Acesso em: 10 abr. 2026.

MARSDEN, T. Towards a real sustainable agri-food security. **The Political Quarterly**, v. 83, p. 139-145, 2012.

MARTIN, P.; BROWN, N.; TURNER, A. Capitalizing hope. **New Genetics and Society**, v. 27, p. 127-143, 2008.

MARTÍNEZ-DALMAU, J.; BERBEL, J.; ORDÓÑEZ-FERNÁNDEZ, R. Nitrogen fertilization: a review. **Sustainability**, 2021.

MASSHURÁ, S. *et al.* **Produtividade total dos fatores na agricultura (PTF)**: avanços, limitações e desafios para a sustentabilidade. Campinas: Instituto de Economia, Universidade Estadual de Campinas, [s.d.]. Disponível em: <https://www.eco.unicamp.br/noticias/produtividade-total-dos-fatores-na-agricultura-ptf-avancos-limitacoes-e-desafios-para-a-sustentabilidade>. Acesso em: 3 jan. 2026.

MATHEWS, J. A. From the petroeconomy to the bioeconomy. **Biofuels, Bioproducts & Biorefining**, v. 3, p. 613-632, 2009.

McCORMICK, K.; KAUTTO, N. The bioeconomy in Europe: an overview. **Sustainability**, v. 5, p. 2589-2608, 2013.

McDONALD, S. **Global trade liberalisation and Brazil**: a single country computable general equilibrium analysis. Report prepared for OECD, 2005.

McDONALD, S.; THIERFELDER, K.; HERTEL, T. W. Global trade reforms and income distribution in developing countries. **e-Journal of Agricultural and Development Economics**, v. 3, n. 1, p. 86-111, 2006.

MELITZ, M. J. The impact of trade on intra-industry reallocations and aggregate industry productivity. **Econometrica**, v. 71, n. 6, p. 1695-1725, 2003.

MELO, N. C. V. *et al.* Consumo de bens e serviços por idosos. **SER Social**, v. 20, p. 112-130, 2018.

MIER Y TERÁN GIMÉNEZ CACHO, M. *et al.* Bringing agroecology to scale: key drivers and emblematic cases. **Agroecology and Sustainable Food Systems**, v. 42, n. 6, p. 637-665, 2018.

MITTER, B. *et al.* A comprehensive overview of eco-friendly bio-fertilizers extracted from living organisms. **Sustainability**, v. 13, n. 15, 2021.

MIYAJIMA, D. N. Cenário de mudanças climáticas, efeitos sobre a produtividade agrícola e seus impactos econômicos nas regiões da Amazônia Legal Brasileira. Dissertação de Mestrado (Cedeplar), UFMG. Belo Horizonte, 2018.

MONTANARELLA, L.; PANAGOS, P. Soil security for the European Union. **Soil Security**, v. 4, art. 100009, 2021.

MONTGOMERY, D. R. **Dirt: the erosion of civilizations**. Berkeley: University of California Press, 2012.

MORDOR INTELLIGENCE. **Organic fertilizers market size & share report, 2026–2031**. Hyderabad: Mordor Intelligence, 2026. Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com>. Acesso em: 10 abr. 2026.

MORGAN, K. Smart specialisation. **Regional Studies**, v. 49, p. 480-482, 2015.

MORRISON, M.; CORNIPS, L. The role of biotechnology news providers. **Science, Technology & Human Values**, v. 37, p. 262-285, 2012.

MUMTAZ, Z.; BOWEN, S.; MUMTAZ, R. Meanings of blood donations. **Health Policy and Planning**, v. 27, p. 147-155, 2012.

MURGAI, R. The Green Revolution and the productivity paradox: evidence from the Indian Punjab. **Agricultural Economics**, v. 25, n. 2-3, p. 199-209, 2001.

NASCIMENTO, A. C. C., NASCIMENTO, M., BARROSO, L. M. A., SOUSA, L. O., & BRAGA, M. J. Identificando os determinantes da eficiência técnica na produção de café de montanha em Minas Gerais. **Brazilian Journal of Biometrics**, 35(3), 461-473. 2017

NAGEL, N. O. *et al.* Prospects for the 2040 Norwegian electricity system: expert views in a probabilistic modeling approach. **Energy Research & Social Science**, v. 100, art. 103102, 2023.

NONNENBERG, M. J. B.; MARTINS, M. M. V. **Carta de Conjuntura**, n. 54, 2022.

OBSTFELD, M.; ROGOFF, K. The mirage of fixed exchange rates. **Journal of Economic Perspectives**, v. 9, n. 4, p. 73-96, 1995. DOI: 10.1257/jep.9.4.73.

OECD. **The bioeconomy to 2030: designing a policy agenda**. Paris: OECD Publishing, 2009. DOI: 10.1787/9789264056886-en.

OECD – ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **Agricultural Policy Monitoring and Evaluation 2025**. Paris: OECD Publishing, 2025.

OECD; FAO. **OECD-FAO Agricultural Outlook 2021-2030**. Paris: OECD, 2021.

OGINO, C. M.; GASQUES, J. G. Fertilizantes: dependência externa e impacto produtivo. In: VIEIRA FILHO, J. E. R.; GASQUES, J. G. (org.). [S.l.]: [s.n.], 2023.

OHANIAN, L.; RAFFO, A.; ROGERSON, R. Long-term changes in labor supply and taxes: evidence from OECD countries, 1956-2004. **Journal of Monetary Economics**, v. 55, n. 8, p. 1353-1362, 2008.

OLLIKAINEN, M. Forestry in bioeconomy: smart green growth for the humankind. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 29, p. 360-366, 2014.

ONICHA, A. D., ONWE, J. C., NGWUTA, N. O., OGUMA, S., & JAHANGER, A. Attaining sustainable development in Nigeria: the role of solid waste, urbanization and pollution in reducing under-five mortality. **Discover sustainability**, 5(1), 357. 2024

ORAIR, R.; SIQUEIRA, F.; GOBETTI, S. Política fiscal e ciclo econômico: uma análise baseada em multiplicadores do gasto público. **XXI Prêmio do Tesouro Nacional**, 41. 2016

PACHECO, V. B.; MENEZES, G. **Inovação agrícola e transbordamentos**. 2019.

PAJURA, R. Composting municipal solid waste and animal manure in response to the current fertilizer crisis: a recent review. **Science of The Total Environment**, v. 912, art. 169221, 2024.

PALANIVELOO, K.; AMRAN, M. A.; NORHASHIM, N. A.; MOHAMAD-FAUZI, N.; PENG-HUI, F.; HUI-WEN, L.; RAZAK, S. A. Food waste composting and microbial community structure profiling. **Processes**, v. 8, n. 6, art. 723, 2020.

PANIS, C. *et al.* Widespread pesticide contamination of drinking water and impact on cancer risk in Brazil. **Environment International**, v. 165, art. 107321, 2022.

PARRA, J. R. P.; COELHO JÚNIOR, A. Aplicação do controle biológico no Brasil. In: PARRA, J. R. P.; PINTO, A. S.; NAVA, D. E.; OLIVEIRA, R. C.; DINIZ, A. J. F. (org.). **Controle biológico com parasitoides e predadores na agricultura brasileira**. Piracicaba: FEALQ, 2019. p. 17-32.

PAUMGARTTEN, F. J. Pesticides and public health in Brazil. **Current Opinion in Toxicology**, v. 22, p. 7-11, 2020.

PECHROVÁ, M. Š.; ŠIMPACH, O. The impact of Farm to Fork and biodiversity strategies. **European Integration**, 2022.

PELAEZ, V.; MIZUKAWA, G.; GALILEI, F.; BORGES, M. T. The dynamics of the bioinputs market in Brazil. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 47, n. 4, p. 380-388, 2017.

PEREIRA JÚNIOR, A. O. *et al.* **Efeito distributivo da precificação de carbono no Brasil**. Brasília: IPEA, 2024.

PEROBELLI, F. S. **Análise espacial das interações econômicas entre estados brasileiros**. 2004. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

PETER, M. W. *et al.* **The theoretical structure of MONASH-MRF**. Melbourne: CoPS, 1996.

PFAU, S. F. *et al.* Visions of sustainability. **Sustainability**, v. 6, p. 1222-1249, 2014.

PIGOU, A. C. **The Economics of Welfare**. London: Macmillan, 1932. (Originalmente publicado em 1920).

PIMENTEL, D. Green revolution agriculture and chemical hazards. **Science of the Total Environment**, v. 188, p. S86-S98, 1996.

PISSARIDES, C. A. **Equilibrium unemployment theory**. 2. ed. Cambridge, MA: MIT Press, 2000.

PIRES, M. C. D. C. Política fiscal e ciclos econômicos no Brasil. **Economia Aplicada**, 18(1), 69-90. 2014.

POLICARPO, M. A., SAMBUICHI, R. H. R., ALVES, F., GUALDANI, C., & PACÍFICO, D. A. **O Programa Nacional de Bioinsumos no âmbito da Política Nacional de Agroecologia e Produção Orgânica: origem, contribuições e potencialidades** (No. 2933). Texto para Discussão. 203. Disponível em: <https://hdl.handle.net/10419/285055>. Acesso em 24 de abril de 2024.

POLLACK, A. White House promotes a bioeconomy. **The New York Times**, 26 abr. 2012.

PONTE, S. From fishery to fork. **Science and Culture**, v. 18, p. 483-495, 2009.

PORSSE, A. A. **Competição tributária regional, externalidades fiscais e federalismo no Brasil: uma abordagem de equilíbrio geral computável**. 2005. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

PRASAD, R. Sustainable agriculture and fertilizer use. **Current science**, v. 77, n. 1, p. 38-43, 1999.

PRESCOTT, E. C. Why do Americans work so much more than Europeans? **Federal Reserve Bank of Minneapolis Quarterly Review**, v. 28, n. 1, p. 2-13, 2004.

PRETTY, J. Agricultural sustainability: concepts, principles and evidence. **Philosophical Transactions of the Royal Society B**, v. 363, p. 447-465, 2008.

PRETTY, J. *et al.* Global assessment of agricultural system redesign for sustainable intensification. **Nature Sustainability**, v. 1, n. 8, p. 441-446, 2018.

PROFILLIDIS, V.; BOTZORIS, G. Air passenger transport and economic activity. **Journal of Air Transport Management**, v. 49, p. 23-27, 2015.

PROQUE, A. L. **Estrutura produtiva, renda e consumo**. Tese (Doutorado em Economia) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2019.

PÜLZL, H.; KLEINSCHMIT, D.; ARTS, B. Bioeconomy: an emerging meta-discourse affecting forest discourses? **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 29, p. 386-393, 2014.

QUINTANA, N. R. G.; CARMO, M. S.; MELO, W. J. **Lodo de esgoto como fertilizante: produtividade agrícola e rentabilidade econômica**. 2011.

QUIROGA, M.; AGÜERO, D.; ZAPATA, R.; BUSILACCHI, H.; BUENO, M. Activadores de crecimiento y biofertilizantes como alternativa al uso de fertilizantes químicos en cultivo de chíá (*Salvia hispanica* L.). **Energías Renovables y Medio Ambiente**, v. 35, p. 31-40, 2015.

RAD, S. M., RAY, A. K., & BARGHI, S. (2022). Water pollution and agriculture pesticide. **Clean Technologies**, 4(4), 1088-1102.

RANGEL, L. E. P.; LIMA, J. L.; PENA JÚNIOR, M. A. G.; SILVA, W. H. **Bioinsumos e sustentabilidade: evidências empíricas sobre adoção, políticas e estrutura de mercado no Brasil**. Brasília: Instituto de Desenvolvimento Sustentável (IDS Brasil), 2025. Disponível em: [https://www.idsbr.org/\\_files/ugd/21e8c4\\_1926f4521ba641db94f423e4729ccca4.pdf](https://www.idsbr.org/_files/ugd/21e8c4_1926f4521ba641db94f423e4729ccca4.pdf).

RANI, L., THAPA, K., KANOJIA, N., SHARMA, N., SINGH, S., GREWAL, A. S., KAUSHAL, J. (2021). An extensive review on the consequences of chemical pesticides on human health and environment. **Journal of cleaner production**, 283, 124657.

RAUCCI, G. S., MOREIRA, C. S., ALVES, P. A., MELLO, F. F., DE ALMEIDA FRAZÃO, L., CERRI, C. E. P., CERRI, C. C. Greenhouse gas assessment of Brazilian soybean production: a case study of Mato Grosso State. **Journal of Cleaner Production**, 96, 418-425. 2015

RESTUCCIA, D.; YANG, D. T.; ZHU, X. Agriculture and aggregate productivity: a quantitative cross-country analysis. **Journal of Monetary Economics**, v. 55, n. 2, p. 234-250, 2008.

RICHARDSON, B. From a fossil fuel to a biobased economy: the politics of industrial biotechnology. **Environment and Planning C: Government and Policy**, v. 30, p. 282-296, 2012.

RIGBY, H. CLARKE, B. O. PRITCHARD, D. L. MEEHAN, B. BESHAN, F. SMITH, S. R. PORTER, N. A. A critical review of nitrogen mineralization in biosolidsamended soil, the associated fertilizer value for crop production and potential for emissions to the environment. **Science of the Total Environment**. London, 541(541), 1310- 1338. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.089>

ROBINSON, C. The joint determination of union status and union wage effects: some tests of alternative models. **Journal of Political Economy**, v. 97, n. 3, p. 639-667, 1989.

- ROCHA, T. M., MARCELINO, P. R. F., DA COSTA, R. A. M., RUBIO-RIBEAUX, D., BARBOSA, F. G., DA SILVA, S. S. (2024). Agricultural bioinputs obtained by solid-state fermentation: from production in biorefineries to sustainable agriculture. **Sustainability**, 16(3), 1076.
- ROCHELLE, T. C. P.; FERREIRA FILHO, J. B. S. Função de custo translog para o algodão em São Paulo. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, 2019.
- ROCKSTRÖM, J. *et al.* A safe operating space for humanity. **Nature**, v. 461, p. 472-475, 2009a.
- ROCKSTRÖM, J. *et al.* Conservation farming strategies in East and Southern Africa. **Sustainable Technology Research**, 2009b.
- ROSEMANN, A. Standardization and regulatory diversity. **Social Science & Medicine**, v. 122, p. 72-80, 2014.
- ROSTOW, W. W. The stages of economic growth. In: **Sociological Worlds**. Abingdon: Routledge, 2013. p. 130-134.
- SALOMÃO NETO, B. A. **Is there evidence of expansionary austerity in Brazil?** Jornadas Internacionales de Finanzas Públicas, 2022.
- SALTER, B. State strategies and geopolitics. **Geopolitics**, v. 14, p. 47-78, 2009.
- SALTER, B.; COOPER, M.; DOICKINS, A. China and the global stem cell bioeconomy. **Regenerative Medicine**, v. 1, p. 671-683, 2006.
- SALTER, B. *et al.* Stem cell science in India. **Regenerative Medicine**, v. 2, p. 75-89, 2007.
- SALTER, W. E. G. Internal and external balance: the role of price and expenditure effects. **Economic Record**, v. 35, n. 71, p. 226-238, 1959.
- SAMBUICHI, R. H. R. *et al.* **A produção de bioinsumos no Brasil: desafios e potencialidades**. Brasília: IPEA, 2023. (Texto para Discussão, n. 2933).
- SAMBUICHI, R. H. R. *et al.* **Bioinsumos no Brasil: desafios da política nacional**. Brasília: IPEA, 2024.
- SAMUELSON, P. A. Interactions between the multiplier analysis and the principle of acceleration. **Review of Economics and Statistics**, v. 21, n. 2, p. 75-78, 1939.
- SAMUELSON, P. A. Theoretical notes on trade problems. **Review of Economics and Statistics**, v. 46, n. 2, p. 145-154, 1964.
- SANTIAGO, F. S. Projeções dos impactos econômicos decorrentes das mudanças demográficas no Brasil para o período de 2010 a 2050. Tese de Doutorado, CEDEPLAR. 2014. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1843/AMSA-9KTPGW>

SANTOS, C. V.; OLIVEIRA, A. F.; FERREIRA FILHO, J. B. S. Potential impacts of climate change on agriculture and the economy in different regions of Brazil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 60, n. 1, art. e220611, 2022.

SANTOS, C. R., DOS SANTOS PEREIRA, I., DOS SANTOS, W. S., GANDRA, L. C., OLIVEIRA, F. S., SANTOS, H. O., ... & SANTOS, E. M. S. Integração Lavoura-Pecuária, Bioinoculantes e Adubação Orgânica: Estratégias para otimização do uso da terra no Vale do Jequitinhonha. **Research, Society and Development**. 12(1), 2023.

SANTOS, M. S.; NOGUEIRA, M. A.; HUNGRIA, M. Outstanding impact of *Azospirillum brasilense* strains Ab-V5 and Ab-V6 on the Brazilian agriculture: lessons that farmers are receptive to adopt new microbial inoculants. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 45, art. e0200128, 2021.

SARAIVA, A. S.; SILVA, R. O.; SOARES, F. A. Tributação sobre bioinsumos no Brasil: desafios e perspectivas. **Revista Brasileira de Política Agrícola**, v. 29, n. 2, p. 45-67, 2020.

SARGENT, T. J.; WALLACE, N. Some unpleasant monetarist arithmetic. **Federal Reserve Bank of Minneapolis Quarterly Review**, v. 5, n. 3, p. 1-17, 1981

SARWAR, M. H. *et al.* Pesticides exposure impacts and need for biopesticides. In: **Biopesticides in Organic Farming**. [S.l.]: [s.n.], 2021.

SAYARA, T.; BASHEER-SALIMIA, R.; HAWAMDE, F.; SÁNCHEZ, A. Recycling of organic wastes through composting: process performance and compost application in agriculture. **Agronomy**, v. 10, n. 11, art. 1838, 2020.

SCHNEIDER, S.; CASSOL, A. Diversidade e heterogeneidade da agricultura familiar no Brasil e algumas implicações para políticas públicas. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 31, n. 2, p. 227-263, 2014.

SCHWARZ, M. T. Navajo identity and blood. **Body & Society**, v. 15, p. 145-168, 2009.

S&P GLOBAL COMMODITY INSIGHTS. **Crop Science market data**. Londres: S&P Global, 2025. Disponível em: <https://www.spglobal.com/commodity-insights/en/products-solutions/crop-science>. Acesso em: 27 ago. 2026.

SESSA, C. B.; SIMONATO, T. C.; DOMINGUES, E. P. **O ciclo das commodities e crescimento desigual**. Brasília: IPEA, 2017.

SETTE, A. B.; COELHO, A. B. Padrão de consumo dos arranjos domiciliares brasileiros em 2008/2009. **Revista Brasileira de Estudos de População**, 2020.

SHOVEN, J. B.; WHALLEY, J. **Applying general equilibrium**. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.

SIEGMEIER, T.; MÖLLER, D. Organic farming and bioenergy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 25, p. 197-204, 2013.

SILVA, J. G.; FERREIRA FILHO, J. B. S. Climate change, agriculture and livestock intensification in Brazil: the Borlaug hypothesis. In: ENCONTRO NACIONAL DE ECONOMIA, 43., 2016. **Anais [...]**. [S.l.]: ANPEC, 2016.

SIMOLA, A. Intensive margin of land use in CGE models—Reviving CRESH functional form. **Land Use Policy**, v. 48, p. 467-481, 2015.

SINDIVEG – SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PRODUTOS PARA DEFESA VEGETAL. **Mercado total de defensivos agrícolas por produto aplicado**. São Paulo: SINDIVEG, 2026. Disponível em: <https://sindiveg.org.br/mercado-total/>. Acesso em: 6 ago. 2025.

SHOVEN, J. B.; WHALLEY, J. **Applying general equilibrium**. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.

SOLOW, R. M. Technical change and the aggregate production function. **Review of Economics and Statistics**, v. 39, n. 3, p. 312-320, 1957.

SONAGLIO, C. M.; BRAGA, M. J.; CAMPOS, A. C. Investimento público e privado no Brasil: evidências dos efeitos crowding-in e crowding-out no período 1995-2006. **Economia**, v. 11, n. 2, p. 383-401, 2010.

STAFFAS, L.; GUSTAVSSON, M.; McCORMICK, K. Strategies and policies for the bioeconomy. **Sustainability**, v. 5, p. 2751-2769, 2013.

STEWART, W. M.; ROBERTS, T. L. Food security and the role of fertilizer. **Procedia Engineering**, 2012.

STONE, R. Linear expenditure systems and demand analysis: an application to the pattern of British demand. **Economic Journal**, v. 64, n. 255, p. 511-527, 1954.

STORM, S. The macroeconomic impact of agricultural policy: A CGE analysis for India. **Journal of Policy Modeling**, v. 16, n. 1, p. 55-95, 1994.

STORY, P.; COX, M. Effects of organophosphorus insecticides on vertebrates. **Wildlife Research**, 2001.

SWAN, T. W. Economic control in a dependent economy. **Economic Record**, v. 36, n. 73, p. 51-66, 1960.

TANG, X., LI, J. H., YANG, J. Y., XIANG, Z. C., HE, Y. Y., HUANG, Y. Z., ... & ZHOU, Z. Agricultural sustainability: Biochar and bio-based polyurethane coupling coating to prepare novel controlled-release fertilizers. **Industrial Crops and Products**, 223, 120296. 2025

TANURE, T. M. P.; DOMINGUES, E. P.; MAGALHÃES, A. S. Regional impacts of climate change on agricultural productivity. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, 2024.

TELLES, T. S.; NOGUEIRA, M. A.; HUNGRIA, M. Economic value of biological nitrogen fixation in soybean crops in Brazil. **Environmental Technology & Innovation**, v. 31, art. 103158, 2023.

TESOURO NACIONAL. **Relatório anual da dívida pública 2024**. Brasília: Secretaria do Tesouro Nacional, 2025.

TETENYI, L.; MAZUR, K. **The Macroeconomic Impact of Agricultural Input Subsidies**. Lisboa: Banco de Portugal, Economics and Research Department, 2024. (Working Papers, w202422).

TILMAN, D. *et al.* Agricultural sustainability and intensive production practices. **Nature**, v. 418, n. 6898, p. 671-677, 2002.

TOEWS, G.; VEZINA, P.-L. Boom goes the price: giant resource discoveries and real exchange rate appreciation. **The Economic Journal**, v. 130, n. 630, p. 1715-1728, 2020.

TOSI, S. *et al.* Effects of pesticides on bees: meta-analysis. **Science of the Total Environment**, 2022.

TRANI, P. E.; TRANI, A. L. **Fertilizantes: cálculo de fórmulas comerciais**. Campinas: IAC, 2011.

VAAJE-KOLSTAD, G. *et al.* An oxidative enzyme boosting polysaccharide conversion. **Science**, v. 330, p. 219-222, 2010.

VAN DER PLOEG, F. Natural resources: curse or blessing? **Journal of Economic Literature**, v. 49, n. 2, p. 366-420, 2011.

VIDAL, M. C.; DIAS, L. C. Bioinsumos e agricultura de baixo carbono no Brasil. **Estudos Avançados**, 2023.

VIDAL, M. C.; DIAS, R. P. Bioinsumos a partir das contribuições da agroecologia. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 18, n. 1, p. 171-192, 2021.

VIDAL, M. C., AMARAL, D. F. S., NOGUEIRA, J. D., MAZZARO, M. A. T., & LIRA, V. M. C. Bioinsumos: a construção de um Programa Nacional pela Sustentabilidade do Agro Brasileiro. **Economic Analysis of Law Review**, 12(3), 557-574. 2021

VIEIRA FILHO, J. E. R.; CONCEIÇÃO, J. C. P. R. Censo Agropecuário 2006: uma crítica ao recorte metodológico. **Radar: tecnologia, produção e comércio exterior**, Brasília, n. 6, p. 9-13, 2010.

VIEIRA FILHO, J. E. R.; FISHLOW, A. **Agricultura e indústria no Brasil: inovação e competitividade**. Brasília: IPEA, 2017.

VON ARNIM, R., TRÖSTER, B., STARITZ, C., & RAZA, W. **Commodity dependence and price volatility in least developed countries: A structuralist computable general equilibrium model with applications to Burkina Faso, Ethiopia and Mozambique** (No. 52). ÖFSE Working Paper. 2015

WALDBY, C. Biobanking in Singapore. **New Genetics and Society**, v. 28, p. 253-265, 2009.

WALDBY, C. Oocyte markets. **New Genetics and Society**, v. 27, p. 19-31, 2008.

WALDBY, C.; COOPER, M. From reproductive work to regenerative labour. **Feminist Theory**, v. 11, p. 3-22, 2010.

WANDERLEY, M. N. B. "Fanja periférica", "pobres do campo", "camponeses": dilemas da inclusão social dos pequenos agricultores familiares. In: DELGADO, G. C.; BERGAMASCO, S. M. P. P. (org.). **Agricultura familiar brasileira: desafios e perspectivas de futuro**. Brasília: Ministério do Desenvolvimento Agrário, 2017. p. 64-83.

WANG, G. *et al.* Agricultural eco-efficiency: challenges and progress. **Sustainability**, v. 14, n. 3, art. 1051, 2022.

WARR, P.; YUSUF, A. A. Fertilizer subsidies and food self-sufficiency in Indonesia. **Agricultural Economics**, v. 45, n. 5, p. 571-588, 2014. DOI: 10.1111/agec.12107.

WEISS, C. H. How can theory-based evaluation make greater headway? **Evaluation Review**, v. 21, n. 4, p. 501-524, 1997. DOI: 10.1177/0193841X9702100405.

WIELD, D. Bioeconomy and the global economy: industrial policies and bio-innovation. **Technology Analysis & Strategic Management**, v. 25, p. 1209-1221, 2013.

WIELD, D. *et al.* Twenty-first century bioeconomy. **Science and Public Policy**, v. 40, p. 17-24, 2013.

WIIG, H. *et al.* Structural adjustment and soil degradation in Tanzania A CGE model approach with endogenous soil productivity. **Agricultural Economics**, v. 24, n. 3, p. 263-287, 2001.

WING, I. S. **Computable general equilibrium models and their use in economy-wide policy analysis**. Cambridge: MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change, 2004. Technical Note n. 6.

WU, R. *et al.* Soil salinity accumulation from greenhouse cultivation. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 192, 2020.

WWF-BRASIL. **Pegada Ecológica**. Disponível em: [https://www.wwf.org.br/nossosconteudos/conceitos\\_/pegada\\_ecologica/](https://www.wwf.org.br/nossosconteudos/conceitos_/pegada_ecologica/). Acesso em: 26 nov. 2025.

XAVIER, A. C. *et al.* New improved Brazilian daily weather gridded data (1961-2020). **International Journal of Climatology**, v. 42, n. 16, p. 8390-8404, 2022.

ZHANG, S.; LI, Y.; CHEN, X.; JIANG, X.; LI, J.; YANG, L.; YIN, X.; ZHANG, X. Occurrence and distribution of microplastics in organic fertilizers in China. **Science of the Total Environment**, 2022. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.157061.

ZHANG, S.; WANG, J.; HAO, X. Fertilization accelerates decomposition of microplastics. **Science of the Total Environment**, 2020.

ZHANG, Y. H. P.; HIMMEL, M. E.; MIELENZ, J. R. Outlook for cellulase improvement: screening and selection strategies. **Biotechnology Advances**, v. 24, p. 452-481, 2006.

ZILBERMAN, D. *et al.* Technology and the future bioeconomy. **Agricultural Economics**, v. 44, p. 95-102, 2013.

ZODROW, G. R.; DIAMOND, J. W. Dynamic overlapping generations computable general equilibrium models and the analysis of tax policy. In: DIXON, P. B.; JORGENSEN, D. W. (ed.). **Handbook of Computable General Equilibrium Modeling**. Amsterdam: North-Holland, 2013. v. 1, p. 743-813.

## APÊNDICE A – Variáveis do modelo BIO-BR e tipo de fechamento

| Componente                                                | Descrição (comum a todos os cenários)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Fechamento base                                           | <p>Período histórico (2024–2025):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• PIB segue trajetória observada, com produtividade endógena.</li> <li>• Investimento, consumo das famílias, consumo do governo e exportações ajustam-se aos valores observados.</li> </ul> <p>Trajетória de referência (2025–2050):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• PIB segue trajetória projetada via produtividade total dos fatores.</li> <li>• Consumo do governo acompanha o crescimento do PIB.</li> </ul> |
| Choque baseline                                           | <p>Choques aplicados ao longo de 2024–2050:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Crescimento populacional conforme projeções demográficas.</li> <li>• Tendência de emprego: 2,2% a.a.</li> <li>• PIB conforme trajetória projetada para o Brasil.</li> </ul> <p><i>No período histórico (2024–2025), também são calibrados pelos dados observados: consumo do governo, investimento, consumo das famílias e exportações.</i></p>                                                                    |
| Fechamento de política por grupo de cenários              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Cenários                                                  | Fechamento de política                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| <p>Cenários 1 e 2</p> <p><i>Orçamento livre</i></p>       | <p>Regra orçamentária:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Consumo do governo segue o crescimento do PIB.</li> <li>• Sem ajuste fiscal — o saldo orçamentário pode variar livremente.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| <p>Cenários 3 e 4</p> <p><i>Equilíbrio por taxaço</i></p> | <p>Regra orçamentária:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Consumo do governo segue o crescimento do PIB.</li> <li>• Saldo orçamentário em relação ao PIB mantido constante.</li> <li>• Compensação por ajuste na alíquota de impostos.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                 |
| <p>Cenários 5 e 6</p> <p><i>Equilíbrio por gastos</i></p> | <p>Regra orçamentária:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Saldo orçamentário em relação ao PIB mantido constante.</li> <li>• Compensação por ajuste no consumo do governo, sem alterar alíquotas.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                      |

Fonte: Modelo BIO-BR

## APÊNDICE B – Descrição dos cenários de simulação para o setor de bioinsumos

| Cenário                                                                                          | Choque                                                                                                                                                    | Detalhes                                                                                                                                                                                                                                                     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Cenário 1: orçamento livre — sem choque de produtividade da terra (2024 – 2050)                  | Aumento acumulado de produtividade nos setores de bioinsumos (BioFer: 0,576%; BioDef: 0,479%; BioComt: 1,351% a.a.), dobrando até 2050, via ashock x1tot. | Efeitos do ganho de produtividade nos setores de bioinsumos sobre a economia, sem restrição no orçamento público e sem efeitos sobre a produtividade da terra. O fechamento utiliza swap $f5_{tot} = f5_{tot3}$ , fazendo o consumo do governo seguir o PIB. |
| Cenário 2: orçamento livre — com choque de produtividade da terra (2024 – 2050)                  | Choque exógeno na produtividade da terra (a1lnd)                                                                                                          | O choque ocorre via produtividade da terra associada ao uso de bioinsumos, e não diretamente sobre a produtividade dos setores. Mantém-se o orçamento público livre.                                                                                         |
| Cenário 3: orçamento equilibrado por taxa — sem choque de produtividade da terra (2024 – 2050)   | Aumento acumulado de produtividade nos setores de bioinsumos (BioFer: 0,576%; BioDef: 0,479%; BioComt: 1,351% a.a.) via ashock x1tot.                     | Mantém-se constante o saldo orçamentário em relação ao PIB. A compensação ocorre por aumento proporcional na receita tributária via mudança na alíquota de imposto (swap $ftaxgen = delsavgovrat$ ).                                                         |
| Cenário 4: orçamento equilibrado por taxa — choque de produtividade da terra (2024 – 2050)       | Choque exógeno na produtividade da terra (a1lnd)                                                                                                          | Mantém-se constante o saldo orçamentário em relação ao PIB, com compensação via aumento da receita tributária (swap $ftaxgen = delsavgovrat$ ).                                                                                                              |
| Cenário 5: orçamento equilibrado por gastos — sem choque de produtividade da terra (2024 – 2050) | Aumento acumulado de produtividade nos setores de bioinsumos (BioFer: 0,576%; BioDef: 0,479%; BioComt: 1,351% a.a.) via ashock x1tot.                     | Mantém-se constante o saldo orçamentário em relação ao PIB. Diferentemente do Cenário 3, a compensação ocorre por redução dos demais itens de consumo do governo (swap $f5_{tot} = delsavgovrat$ ), sem alterar alíquotas de imposto.                        |
| Cenário 6: orçamento equilibrado por gastos — choque de produtividade da terra (2024 – 2050)     | Choque exógeno na produtividade da terra (a1lnd)                                                                                                          | Mantém-se constante o saldo orçamentário em relação ao PIB, com ajuste pela redução dos demais itens de consumo do governo (swap $f5_{tot} = delsavgovrat$ ).                                                                                                |

Fonte: Modelo BIO-BR

## APÊNDICE C – Contribuição para o PIB pelo lado da despesa, por cenário e horizonte

Contribuição para o PIB pelo lado da despesa, por cenário e horizonte  
(variação acumulada, em pontos percentuais)

|                    | C1            |               |               | C2            |               |               | C3            |               |               | C4            |               |               | C5            |               |               | C6            |               |               |
|--------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Componente         | 2024-2030     | 2024-2039     | 2024-2050     | 2024-2030     | 2024-2039     | 2024-2050     | 2024-2030     | 2024-2039     | 2024-2050     | 2024-2030     | 2024-2039     | 2024-2050     | 2024-2030     | 2024-2039     | 2024-2050     | 2024-2030     | 2024-2039     | 2024-2050     |
| Consumo            | +0,071        | +0,318        | +0,273        | +0,004        | +0,026        | +0,116        | -0,004        | -0,013        | -0,016        | +0,000        | +0,000        | -0,019        | +0,014        | +0,028        | +0,030        | +0,001        | +0,004        | +0,029        |
| Investimento       | +0,038        | +0,206        | +0,110        | +0,002        | +0,015        | +0,060        | -0,001        | -0,003        | -0,009        | +0,000        | -0,001        | -0,004        | -0,016        | -0,031        | -0,055        | +0,001        | +0,003        | +0,031        |
| Governo            | +0,008        | +0,047        | +0,073        | +0,001        | +0,004        | +0,026        | +0,000        | +0,000        | +0,000        | +0,000        | +0,001        | +0,007        | +0,000        | +0,000        | -0,001        | -0,001        | -0,003        | -0,031        |
| Estoques           | +0,000        | -0,001        | -0,001        | +0,000        | +0,000        | -0,003        | +0,002        | +0,004        | -0,002        | +0,000        | +0,000        | -0,002        | +0,002        | +0,009        | +0,017        | +0,000        | +0,000        | -0,003        |
| Exportações        | -0,041        | -0,224        | -0,163        | -0,001        | -0,014        | -0,032        | +0,001        | +0,002        | +0,002        | +0,001        | +0,004        | +0,054        | -0,004        | -0,007        | -0,011        | +0,001        | +0,004        | +0,068        |
| Importações        | -0,032        | -0,111        | -0,001        | -0,002        | -0,010        | -0,045        | +0,000        | +0,000        | +0,000        | +0,000        | +0,000        | -0,009        | +0,000        | +0,000        | +0,000        | +0,000        | -0,001        | -0,026        |
| <b>PIB (total)</b> | <b>+0,044</b> | <b>+0,235</b> | <b>+0,291</b> | <b>+0,004</b> | <b>+0,021</b> | <b>+0,122</b> | <b>-0,002</b> | <b>-0,010</b> | <b>-0,025</b> | <b>+0,001</b> | <b>+0,004</b> | <b>+0,027</b> | <b>-0,004</b> | <b>-0,001</b> | <b>-0,020</b> | <b>+0,002</b> | <b>+0,007</b> | <b>+0,068</b> |

Cenários ímpares (C1, C3, C5): apenas efeito de escala. Cenários pares (C2, C4, C6): incorporam canal de produtividade da terra. Pares (C1,C2), (C3,C4) e (C5,C6): orçamento livre, ajuste pela receita e ajuste pela despesa. Em verde, contribuições positivas relevantes ( $\geq 0,05$  p.p.); em vermelho, negativas relevantes.

Fonte: Resultados da pesquisa – Modelo BIO-BR.

## APÊNDICE D – Contribuição para o PIB pelo lado da renda, por cenário e horizonte

Contribuição para o PIB pelo lado da renda, por cenário e horizonte  
(variação acumulada, em pontos percentuais)

|                    | C1            |               |               | C2            |               |               | C3            |               |               | C4            |               |               | C5            |               |               | C6            |               |               |
|--------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Componente         | 2024–2030     | 2024–2039     | 2024–2050     | 2024–2030     | 2024–2039     | 2024–2050     | 2024–2030     | 2024–2039     | 2024–2050     | 2024–2030     | 2024–2039     | 2024–2050     | 2024–2030     | 2024–2039     | 2024–2050     | 2024–2030     | 2024–2039     | 2024–2050     |
| Terra              | +0,000        | +0,000        | +0,000        | +0,000        | +0,000        | +0,000        | -0,002        | -0,005        | -0,011        | +0,000        | +0,000        | +0,000        | +0,001        | +0,003        | +0,005        | +0,000        | +0,000        | +0,000        |
| Trabalho           | +0,020        | +0,031        | +0,036        | +0,001        | +0,006        | +0,033        | -0,001        | -0,011        | -0,016        | +0,000        | +0,000        | -0,001        | +0,005        | +0,028        | +0,057        | +0,000        | +0,001        | +0,011        |
| Capital            | +0,011        | +0,155        | +0,260        | +0,001        | +0,009        | +0,040        | -0,001        | -0,004        | -0,025        | +0,000        | -0,001        | +0,000        | +0,001        | -0,002        | -0,035        | +0,000        | +0,002        | +0,023        |
| Tributos indiretos | +0,011        | +0,047        | -0,019        | +0,001        | +0,005        | +0,028        | +0,000        | +0,000        | -0,001        | +0,000        | +0,001        | +0,014        | +0,000        | +0,000        | +0,008        | +0,000        | +0,001        | +0,016        |
| Mudança técnica    | +0,000        | +0,001        | +0,012        | +0,001        | +0,003        | +0,021        | +0,000        | +0,000        | +0,000        | +0,001        | +0,002        | +0,014        | +0,000        | +0,000        | +0,000        | +0,001        | +0,003        | +0,019        |
| Eficiência         | +0,000        | +0,000        | +0,000        | +0,000        | +0,000        | +0,000        | +0,007        | +0,019        | +0,003        | +0,000        | +0,000        | +0,000        | +0,012        | +0,055        | +0,068        | +0,000        | +0,000        | +0,000        |
| <b>PIB (total)</b> | <b>+0,042</b> | <b>+0,234</b> | <b>+0,289</b> | <b>+0,004</b> | <b>+0,023</b> | <b>+0,122</b> | <b>+0,003</b> | <b>-0,001</b> | <b>-0,050</b> | <b>+0,001</b> | <b>+0,002</b> | <b>+0,027</b> | <b>+0,019</b> | <b>+0,084</b> | <b>+0,103</b> | <b>+0,001</b> | <b>+0,007</b> | <b>+0,069</b> |

Cenários ímpares (C1, C3, C5): apenas efeito de escala. Cenários pares (C2, C4, C6): incorporam canal de produtividade da terra. Pares (C1,C2), (C3,C4) e (C5,C6): orçamento livre, ajuste pela receita e ajuste pela despesa. Em verde, contribuições positivas relevantes ( $\geq 0,05$  p.p.); em vermelho, negativas relevantes.

Fonte: Resultados da pesquisa – Modelo BIO-BR.

**APÊNDICE E – Detalhamento do setor de defensivos biológicos (biodefensivos)**

| <b>Defensivos Biológicos (Biodefensivos)</b> |               |                 |                 |              |
|----------------------------------------------|---------------|-----------------|-----------------|--------------|
|                                              | Produção (Kg) | Importação (Kg) | Exportação (Kg) | Vendas (kg)  |
| <b>2015</b>                                  | 53.108,18     | 149.236,11      | 0               | 190.585,57   |
| <b>2016</b>                                  | 93.923,16     | 44.394,85       | 3.761,11        | 176.159,70   |
| <b>2017</b>                                  | 135.847,26    | 34.713,52       | 194,8           | 188.499,34   |
| <b>2018</b>                                  | 222.041,23    | 125.692,870     | 756,390         | 327.607,420  |
| <b>2019</b>                                  | 326.732,29    | 151.380,04      | 5.225,83        | 492.725,96   |
| <b>2020</b>                                  | 480.388,78    | 213.177,92      | 5.289,61        | 599.373,97   |
| <b>2021</b>                                  | 1.204.897,26  | 218.285,29      | 5.534,31        | 1.339.222,96 |
| <b>2022</b>                                  | 3.013.605,79  | 1.258.320,93    | 13.160,00       | 3.860.730,00 |
| <b>2023</b>                                  | 4.918.390,46  | 411.466,38      | 234.295,18      | 3.816.925,51 |
| <b>CAGR</b>                                  | 76,1%         | 13,5%           | 0,0%            | 45,4%        |
| <b>Variação 2015-2020</b>                    | 805%          | 43%             | 0%              | 214%         |
| <b>Variação 2021-2023</b>                    | 308%          | 88%             | 4134%           | 185%         |
| <b>Variação 2015-2023</b>                    | 9161%         | 176%            | 0%              | 1903%        |

Fonte: IBAMA (2024)

**APÊNDICE F– Detalhamento do setor de defensivos químicos (agrotóxicos)**

| <b>Defensivos Químicos</b> |                   |                     |                     |                 |                            |
|----------------------------|-------------------|---------------------|---------------------|-----------------|----------------------------|
|                            | Produção<br>(Ton) | Importação<br>(Ton) | Exportação<br>(Ton) | Vendas<br>(Ton) | Arrecadação setor<br>(R\$) |
| <b>2015</b>                | 457.714,29        | 125.892,75          | 7.232,34            | 521.525,40      | 31.982.400.000,00          |
| <b>2016</b>                | 438.937,67        | 138.371,59          | 7.549,82            | 541.861,09      | 33.155.950.000,00          |
| <b>2017</b>                | 438.181,15        | 128.064,75          | 8.837,67            | 539.944,94      | 28.408.800.000,00          |
| <b>2018</b>                | 416.549,21        | 144.436,47          | 7.617,65            | 549.280,44      | 38.442.184.000,00          |
| <b>2019</b>                | 494.092,38        | 171.931,39          | 7.909,38            | 620.537,98      | 53.258.850.000,00          |
| <b>2020</b>                | 502.848,47        | 185.721,01          | 6.131,63            | 685.745,68      | 62.385.180.000,00          |
| <b>2021</b>                | 534.369,48        | 191.927,16          | 6.655,19            | 719.507,44      | 71.753.500.000,00          |
| <b>2022</b>                | 664.434,76        | 283.307,36          | 5.838,79            | 800.652,17      | 104.693.988.000,00         |
| <b>2023</b>                | 465.340,62        | 326.357,60          | 6.033,49            | 755.489,00      | 144.855.000.000,00         |
| <b>CAGR</b>                | 0,21%             | 12,64%              | -2,24%              | 4,74%           | 20,78%                     |
| <b>Variação 2015-2020</b>  | 9,9%              | 47,5%               | -15,2%              | 31,5%           | 95,1%                      |
| <b>Variação 2021-2023</b>  | -13%              | 70%                 | -9%                 | 5%              | 102%                       |
| <b>Variação 2015-2023</b>  | 1,67%             | 159,23%             | -16,58%             | 44,86%          | 352,92%                    |

Fonte: IBAMA (2024); Sindiveg (2024)

## APÊNDICE G – Detalhamento do setor de fertilizantes químicos

|                           | Fertilizantes químicos |                         |                         |                     |                             |                                         |
|---------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------|-----------------------------|-----------------------------------------|
|                           | <i>Produção (Ton)</i>  | <i>Importação (Ton)</i> | <i>Exportação (Ton)</i> | <i>Vendas (Ton)</i> | Preço médio (R\$/toneladas) | Arrecadação setor produção <sup>1</sup> |
| <b>2015</b>               | 9.115.260,00           | 21.087.299,00           | 526.173,00              | 30.201.998,00       | R\$ 1.200,00                | R\$ 10.938.312.000,00                   |
| <b>2016</b>               | 9.040.747,00           | 24.481.089,00           | 549.444,00              | 34.083.415,00       | -                           | -                                       |
| <b>2017</b>               | 8.184.613,00           | 26.324.628,00           | 331.624,00              | 34.438.840,00       | R\$ 1.300,00                | R\$ 10.639.996.900,00                   |
| <b>2018</b>               | 8.169.543,00           | 27.496.625,00           | 336.071,00              | 35.506.322,00       | R\$ 1.400,00                | R\$ 11.437.360.200,00                   |
| <b>2019</b>               | 7.122.834,00           | 29.578.620,00           | 278.632,00              | 36.238.381,00       | R\$ 1.700,00                | R\$ 12.108.817.800,00                   |
| <b>2020</b>               | 6.374.264,00           | 32.872.543,00           | 584.118,00              | 40.564.138,00       | R\$ 1.800,00                | R\$ 11.473.675.200,00                   |
| <b>2021</b>               | 7.210.335,00           | 39.258.338,00           | 683.830,00              | 45.855.071,00       | R\$ 2.230,00                | R\$ 16.600.000.000,00                   |
| <b>2022</b>               | 7.450.699,00           | 34.606.843,00           | 524.788,00              | 41.077.519,00       | R\$ 3.390,00                | R\$ 22.193.000.000,00                   |
| <b>2023</b>               | 6.796.612,00           | 39.439.343,00           | 566.251,00              | 45.825.687,00       | R\$ 3.325,19                | R\$ 22.600.000.000,00                   |
| <b>CAGR</b>               | -3,6%                  | 8,1%                    | 0,9%                    | 5,3%                | 13,6%                       | 9,5%                                    |
| <b>Variação 2015-2020</b> | -30%                   | 56%                     | 11%                     | 34%                 | 50%                         | 5%                                      |
| <b>Variação 2021-2023</b> | -6%                    | 0%                      | -17%                    | 0%                  | 49%                         | 36%                                     |
| <b>Variação 2015-2023</b> | -25,44%                | 87,03%                  | 7,62%                   | 51,73%              | 177,10%                     | 106,61%                                 |

<sup>1</sup> Valores correntes (R\$)

Fonte: ANDA (2024); Conab (2024)

**APÊNDICE H – Mercado nacional de bioinsumos em valores correntes (R\$)**

|                               | <b>Biofertilizantes</b> | <b>Biodefensivos</b> | <b>Total bioinsumos</b> | <b>Fonte</b> |
|-------------------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------|--------------|
| <b>2015</b>                   | R\$ 62.897.378,28       | R\$ 167.936.000,00   | R\$ 314.486.891,39      | Estimativa   |
| <b>2016</b>                   | R\$ 183.188.614,23      | R\$ 209.920.000,00   | R\$ 393.108.614,23      | Estimativa   |
| <b>2017</b>                   | R\$ 228.985.767,79      | R\$ 262.400.000,00   | R\$ 491.385.767,79      | CropLife     |
| <b>2018</b>                   | R\$ 102.912.000,00      | R\$ 425.088.000,00   | R\$ 528.000.000,00      | CropLife     |
| <b>2019</b>                   | R\$ 209.500.000,00      | R\$ 465.500.000,00   | R\$ 675.000.000,00      | CropLife     |
| <b>2020</b>                   | R\$ 470.000.000,00      | R\$ 530.000.000,00   | R\$ 1.000.000.000,00    | S&P Global.  |
| <b>2021</b>                   | R\$ 780.000.000,00      | R\$ 3.120.000.000,00 | R\$ 3.900.000.000,00    | CropLife     |
| <b>2022</b>                   | R\$ 828.000.000,00      | R\$ 3.772.000.000,00 | R\$ 4.600.000.000,00    | CropLife     |
| <b>2023</b>                   | R\$ 950.000.000,00      | R\$ 3.950.000.000,00 | R\$ 5.000.000.000,00    | CropLife     |
| <b>CAGR</b>                   | 40,4%                   | 48,4%                | 41,3%                   |              |
| <b>Variação<br/>2015-2023</b> | 1.410%                  | 2.252%               | 1.490%                  |              |

Fonte: CropLife Brasil com a S&P Global (2023)

**APÊNDICE I - Desvios acumulados (%) do nível de atividade (x1tot) por setor, cenário e horizonte temporal (continua)**

|                                 | C1             |               |                | C2             |               |                | C3             |               |                | C4             |               |                |
|---------------------------------|----------------|---------------|----------------|----------------|---------------|----------------|----------------|---------------|----------------|----------------|---------------|----------------|
|                                 | 2024 –<br>2030 | 2024-<br>2039 | 2024 –<br>2050 | 2024 –<br>2030 | 2024-<br>2039 | 2024 –<br>2050 | 2024 –<br>2030 | 2024-<br>2039 | 2024 –<br>2050 | 2024 –<br>2030 | 2024-<br>2039 | 2024 –<br>2050 |
| Agricultura                     | 0,02           | -0,38         | 0,22           | 0,02           | -0,38         | 0,25           | 0,08           | 0,20          | 0,27           | 0,09           | 0,24          | 0,36           |
| Pecuária                        | 0,04           | 0,09          | 0,21           | 0,04           | 0,09          | 0,21           | 0,02           | 0,03          | 0,02           | 0,05           | 0,08          | 0,13           |
| Florestas e Aquicultura         | 0,00           | 0,01          | 0,10           | 0,00           | 0,01          | 0,10           | 0,00           | -0,01         | -0,06          | 0,01           | 0,05          | 0,07           |
| Outras Indústrias Extrativas    | -0,18          | -0,87         | -0,15          | -0,18          | -0,87         | -0,16          | -0,01          | -0,05         | -0,10          | 0,00           | 0,02          | 0,01           |
| Petróleo e Gás                  | -0,12          | -0,40         | -0,03          | -0,12          | -0,40         | -0,03          | -0,02          | -0,04         | -0,09          | 0,01           | 0,04          | 0,05           |
| Abate e Processamento de Carnes | -0,06          | -0,12         | 0,11           | -0,06          | -0,12         | 0,11           | -0,01          | 0,01          | -0,01          | -0,01          | 0,04          | 0,08           |
| Laticínios e Derivados          | 0,08           | 0,47          | 0,39           | 0,08           | 0,47          | 0,40           | -0,01          | 0,01          | -0,03          | 0,00           | 0,07          | 0,11           |
| Açúcar                          | -0,11          | -0,74         | 0,05           | -0,11          | -0,74         | 0,08           | 0,06           | 0,17          | 0,20           | 0,07           | 0,20          | 0,28           |
| Outros Produtos Alimentícios    | 0,02           | 0,12          | 0,19           | 0,02           | 0,12          | 0,20           | 0,00           | 0,01          | -0,01          | 0,01           | 0,05          | 0,08           |
| Óleos Vegetais e Gorduras       | -0,13          | -0,43         | -0,01          | -0,13          | -0,43         | 0,00           | 0,00           | 0,02          | 0,01           | 0,01           | 0,06          | 0,10           |
| Bebidas                         | -0,05          | -0,33         | 0,27           | -0,05          | -0,33         | 0,27           | -0,01          | -0,03         | -0,07          | 0,00           | 0,03          | 0,05           |
| Fumo                            | -0,08          | -0,69         | 0,02           | -0,08          | -0,69         | 0,03           | 0,03           | 0,13          | 0,10           | 0,05           | 0,17          | 0,19           |
| Têxteis, Vestuário e Calçados   | -0,05          | -0,10         | 0,12           | -0,05          | -0,10         | 0,12           | -0,01          | -0,03         | -0,06          | 0,00           | 0,02          | 0,04           |
| Produtos de Madeira             | -0,13          | -0,40         | -0,13          | -0,13          | -0,40         | -0,13          | -0,02          | -0,05         | -0,10          | 0,01           | 0,03          | 0,03           |
| Celulose e Papel                | -0,08          | -0,27         | -0,02          | -0,08          | -0,27         | -0,02          | -0,01          | -0,03         | -0,08          | 0,00           | 0,02          | 0,03           |
| Refino de Petróleo              | 0,02           | 0,13          | 0,20           | 0,02           | 0,13          | 0,21           | -0,01          | -0,02         | -0,04          | 0,02           | 0,06          | 0,10           |
| Etanol e Biocombustíveis        | 0,06           | 0,10          | 0,22           | 0,06           | 0,10          | 0,24           | 0,02           | 0,05          | 0,04           | 0,04           | 0,11          | 0,16           |
| Químicos Inorgânicos            | -0,09          | -0,47         | 0,20           | -0,09          | -0,48         | 0,21           | 0,03           | 0,07          | 0,11           | 0,05           | 0,14          | 0,25           |
| Adubos e Fertilizantes          | 0,00           | -0,37         | 0,20           | 0,00           | -0,37         | 0,23           | 0,07           | 0,16          | 0,22           | 0,08           | 0,21          | 0,32           |
| Biofertilizantes                | 2,76           | 7,91          | 14,56          | 2,76           | 7,91          | 14,56          | 2,76           | 7,91          | 14,56          | 2,76           | 7,91          | 14,56          |
| Químicos Orgânicos              | -0,11          | -0,61         | 0,15           | -0,11          | -0,61         | 0,15           | 0,02           | 0,05          | 0,07           | 0,03           | 0,11          | 0,21           |
| Resinas e Fibras                | -0,16          | -0,56         | -0,04          | -0,16          | -0,56         | -0,04          | -0,02          | -0,05         | -0,10          | 0,01           | 0,03          | 0,05           |
| Defensivos Agrícolas            | -0,05          | -0,51         | 0,16           | -0,05          | -0,51         | 0,18           | 0,06           | 0,13          | 0,19           | 0,07           | 0,19          | 0,30           |
| Biodefensivos                   | 2,30           | 6,59          | 12,06          | 2,30           | 6,59          | 12,06          | 2,30           | 6,59          | 12,06          | 2,30           | 6,59          | 12,06          |
| Outros Produtos Químicos        | -0,14          | -0,50         | 0,01           | -0,14          | -0,50         | 0,01           | 0,00           | -0,01         | -0,04          | 0,01           | 0,05          | 0,08           |

|                                            | C1    |       |       | C2    |       |       | C3    |       |       | C4    |       |       |
|--------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Tintas, Vernizes e Revestimentos           | 0,00  | 0,24  | 0,15  | 0,00  | 0,24  | 0,15  | -0,02 | -0,05 | -0,08 | 0,02  | 0,06  | 0,07  |
| Perfumaria, Higiene e Farmacêuticos        | 0,03  | 0,18  | 0,16  | 0,03  | 0,18  | 0,16  | -0,01 | -0,03 | -0,06 | 0,00  | 0,01  | 0,01  |
| Produtos de Minerais Não Metálicos         | 0,06  | 0,48  | 0,17  | 0,06  | 0,48  | 0,17  | -0,02 | -0,05 | -0,07 | 0,02  | 0,08  | 0,09  |
| Ferro e Aço                                | -0,17 | -0,54 | -0,09 | -0,17 | -0,54 | -0,10 | -0,01 | -0,05 | -0,10 | 0,02  | 0,04  | 0,04  |
| Metais Não Ferrosos                        | -0,22 | -0,90 | -0,11 | -0,22 | -0,90 | -0,12 | -0,01 | -0,06 | -0,11 | 0,01  | 0,02  | 0,03  |
| Produtos de Metal                          | -0,06 | -0,15 | 0,08  | -0,06 | -0,16 | 0,08  | 0,01  | -0,03 | -0,05 | 0,05  | 0,07  | 0,10  |
| Eletrônicos                                | -0,02 | 0,11  | 0,07  | -0,02 | 0,11  | 0,07  | -0,02 | -0,06 | -0,10 | 0,02  | 0,04  | 0,05  |
| Equipamentos de Informática                | 0,14  | 0,76  | 0,23  | 0,14  | 0,76  | 0,24  | -0,03 | -0,07 | -0,10 | 0,02  | 0,06  | 0,07  |
| Equipamentos Médico-Hospitalares e Ópticos | 0,07  | 0,47  | 0,04  | 0,07  | 0,48  | 0,04  | -0,03 | -0,07 | -0,12 | 0,01  | 0,05  | 0,05  |
| Máquinas e Equipamentos Elétricos          | 0,03  | 0,13  | 0,06  | 0,02  | 0,13  | 0,06  | -0,01 | -0,05 | -0,09 | 0,03  | 0,06  | 0,08  |
| Manutenção de Máquinas e Equipamentos      | -0,08 | -0,46 | 0,04  | -0,08 | -0,46 | 0,04  | 0,07  | 0,00  | 0,00  | 0,13  | 0,12  | 0,16  |
| Automóveis e Utilitários                   | -0,01 | 0,17  | 0,05  | -0,01 | 0,17  | 0,05  | -0,03 | -0,07 | -0,12 | 0,01  | 0,04  | 0,04  |
| Peças e Acessórios para Veículos           | -0,13 | -0,41 | -0,07 | -0,13 | -0,41 | -0,08 | -0,02 | -0,06 | -0,12 | 0,01  | 0,02  | 0,02  |
| Outros Equipamentos de Transporte          | -0,18 | -0,62 | -0,11 | -0,18 | -0,62 | -0,11 | -0,04 | -0,07 | -0,13 | 0,01  | 0,02  | 0,01  |
| Indústrias Diversas                        | -0,05 | -0,12 | 0,01  | -0,05 | -0,12 | 0,00  | -0,02 | -0,04 | -0,10 | 0,01  | 0,03  | 0,04  |
| Eletricidade, Gás e Utilidades             | 0,02  | 0,15  | 0,23  | 0,02  | 0,15  | 0,23  | 0,00  | -0,01 | -0,02 | 0,01  | 0,05  | 0,08  |
| Água, Esgoto e Resíduos                    | 0,02  | 0,14  | 0,23  | 0,02  | 0,14  | 0,23  | 0,00  | -0,02 | -0,04 | 0,00  | 0,01  | 0,02  |
| Biocompostáveis                            | 6,93  | 20,64 | 39,80 | 6,93  | 20,64 | 39,80 | 6,93  | 20,64 | 39,80 | 6,93  | 20,64 | 39,80 |
| Construção                                 | 0,15  | 0,99  | 0,36  | 0,15  | 0,99  | 0,37  | -0,04 | -0,08 | -0,12 | 0,03  | 0,09  | 0,09  |
| Comércio                                   | 0,08  | 0,31  | 0,22  | 0,08  | 0,32  | 0,23  | 0,00  | -0,01 | -0,02 | 0,02  | 0,06  | 0,10  |
| Transporte de Cargas                       | -0,01 | 0,00  | 0,14  | -0,01 | 0,00  | 0,14  | 0,00  | -0,01 | -0,04 | 0,02  | 0,06  | 0,09  |
| Transporte Terrestre de Passageiros        | 0,17  | 1,03  | 0,73  | 0,17  | 1,04  | 0,74  | -0,03 | -0,08 | -0,17 | 0,01  | 0,04  | 0,06  |
| Transporte Aéreo                           | -0,06 | -0,10 | 0,12  | -0,06 | -0,10 | 0,12  | -0,02 | -0,04 | -0,08 | 0,01  | 0,02  | 0,04  |
| Armazenagem e Correio                      | 0,03  | 0,16  | 0,19  | 0,03  | 0,16  | 0,19  | -0,01 | -0,04 | -0,08 | 0,02  | 0,04  | 0,07  |
| Serviços de Informação                     | 0,01  | 0,20  | 0,21  | 0,01  | 0,20  | 0,22  | -0,01 | -0,05 | -0,08 | 0,01  | 0,04  | 0,04  |
| Serviços Financeiros                       | 0,01  | 0,16  | 0,37  | 0,01  | 0,16  | 0,37  | -0,01 | -0,04 | -0,08 | 0,00  | 0,02  | 0,04  |
| Serviços Técnicos e Administrativos        | -0,03 | -0,04 | 0,10  | -0,03 | -0,04 | 0,10  | -0,01 | -0,03 | -0,06 | 0,00  | 0,02  | 0,03  |
| Administração Pública                      | 0,04  | 0,22  | 0,27  | 0,04  | 0,22  | 0,28  | 0,00  | -0,02 | -0,05 | -0,08 | -0,14 | -0,22 |
| Outros Serviços                            | 0,06  | 0,28  | 0,26  | 0,06  | 0,28  | 0,27  | -0,01 | -0,03 | -0,06 | 0,01  | 0,02  | 0,03  |

**ANEXO A – Descrição dos Produtos da Lavoura Permanente e da Lavoura Temporária**

| <b>Lavoura Temporária</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | <b>Lavoura temporária</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Abóbora, algodão herbáceo, alho, amendoim em casca, arroz em casca, aveia branca em grão, batata-inglesa, cana-de-açúcar, cebola, centeio em grão, cevada em casca, colza, ervilha em grão, fava em grão, feijão preto em grão, feijão de cor em grão, feijão fradinho em grão, feijão verde, fumo em folha seca, gergelim, girassol, juta, linho, malva, mamona, mandioca, melancia, melão, milho em grão, rami, soja em grão, sorgo em grão, sorgo vassoura, tomate rasteiro, trigo em grão, trigo preto em grão, tricalhe em grão, forrageiras para corte, cana forrageira, milho forrageira, palma forrageira, sorgo forrageiros, outros produtos, sementes de algodão, sementes de arroz, sementes de feijão, sementes de milho, sementes de soja, sementes de trigo, sementes de forrageiras, sementes de batata-inglesa, toletes de cana de açúcar, sementes e outras formas de propagação de outros produtos. | Abacate, Açaí (fruto), acerola, agave/sisal, algodão arbóreo, ameixa, amora, atemoia, azeitona, banana, borracha, cacau, café arábica em grão, café canephora em grão, caju, camu-camu, carambola, chá-da-índia, cravo da Índia, dendê, erva mate, figo, fruta de Conde, goiaba, Guaraná, jabuticaba, jambo, kiwi, laranja, lichia, Lima, limão, louro, maçã, manga, mamão, maracujá, nectarina, nêspera, noz, palmito, pera, pêssigo, pimenta-do-reino, pitaia, pitanga, romã, tangerina, urucum, uva, pupunha, cupuaçu, outros produtos. |

Fonte: Elaboração própria com base no Censo Agropecuário/IBGE (2017).

## ANEXO B - Declaração de Uso de Inteligência Artificial Generativa (IAG)

*Em conformidade com a Portaria CNPq nº 2.664, de 6 de março de 2026 (art. 9º, I, “c”), que institui a Política de Integridade na Atividade Científica do CNPq.*

Declaro, para os devidos fins, que foram utilizadas ferramentas de Inteligência Artificial Generativa (IAG) no desenvolvimento deste trabalho, conforme especificação de ferramenta, fase e finalidade abaixo:

| Ferramenta         | Fase da pesquisa      | Finalidade do uso                                                                          |
|--------------------|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| Claude (Anthropic) | Correção ortográfica  | Avaliação e adequação do texto às normas cultas da língua portuguesa                       |
| Claude (Anthropic) | Revisão de códigos    | Revisão de comandos em linguagem R e Python para a produção dos resultados do trabalho     |
| Connected Papers   | Revisão de literatura | Identificação de conexões entre artigos para subsidiar a abordagem de determinada temática |

Declaro ainda que:

- (a) Todo o uso das ferramentas acima ocorreu sob supervisão e verificação humana, cabendo a mim a revisão crítica de todos os conteúdos gerados ou auxiliados por IAG;
- (b) Nenhum conteúdo gerado por IAG foi submetido como se fosse de autoria humana, nos termos do art. 9º, I, “d”, da Portaria CNPq nº 2.664/2026;
- (c) Assumo integral responsabilidade pelo conteúdo final deste trabalho, inclusive por eventuais imprecisões ou plágios decorrentes do uso das ferramentas, conforme a referida portaria.

Documento assinado digitalmente  
 **DRYELLI JALES COSTA**  
 Data: 26/06/2026 10:11:55-0300  
 Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Dryelli Jales Costa  
 Universidade Federal de Juiz de Fora  
 Programa de Pós-graduação em Economia  
 Doutorado em Economia

Juiz de Fora, 25 de junho de 2026