UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ | UFPA
NÚCLEO DE ALTOS ESTUDOS AMAZÔNICOS | NAEA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DO TRÓPICO ÚMIDO | PPGDSTU

CLARA VITÓRIA DE ARAÚJO SOUZA

ECONOMIA DO ESGOTAMENTO: Há sustentabilidade na intensificação biotecnológica da Soja “pronta para” se desenvolver no Pará?

Belém
2024

CLARA VITÓRIA DE ARAÚJO SOUZA

ECONOMIA DO ESGOTAMENTO: Há sustentabilidade na intensificação biotecnológica da Soja “pronta para” se desenvolver no Pará?

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Sustentável do Trópico Úmido (PPGDSTU), do Núcleo de Altos Estudos Amazônicos (NAEA), da Universidade Federal do Pará (UFPA), como requisito à obtenção do título de Mestre em Planejamento do Desenvolvimento.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Folhes

Belém

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

D278e de Araújo, Clara Vitória Souza.
ECONOMIA DO ESGOTAMENTO: : Há sustentabilidade na intensificação biotecnológica da Soja “pronta para” se desenvolver no Pará? / Clara Vitória de Araújo Souza. — 2024.
148 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Ricardo Folhes
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Núcleo de Altos Estudos Amazônicos, Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Sustentável do Trópico Úmido, Belém, 2024.

1. Agricultura. 2. Interdisciplinar. 3. Desenvolvimento Sustentável. 4. Soja Aspectos econômicos . 5. Proteínas Biotecnologia. I. Título.

CDD 333

CLARA VITÓRIA DE ARAÚJO SOUZA

ECONOMIA DO ESGOTAMENTO: há sustentabilidade na intensificação biotecnológica da Soja “pronta para” se desenvolver no Pará?

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Sustentável do Trópico Úmido (PPGDSTU), do Núcleo de Altos Estudos Amazônicos (NAEA), da Universidade Federal do Pará (UFPA), como requisito à obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento Agrário.

Aprovada em: 05 de novembro de 2024.

Banca Examinadora:

Presidente

Prof. Dr. Ricardo Folhes

Orientador - PPGDSTU/NAEA/UFPA

Prof. Dr. Francisco de Assis Costa

Examinador Interno - PPGDSTU/NAEA/UFPA

Prof. Dr. Harley Silva

Examinador Externo - ICSA/UFPA

Prof. Dr. Valdir Marcos Stefenon

Examinador Externo - PPGRGV/CCA/UFSC

Dedico este trabalho às crianças, as de todos e em especial aos meus filhos, que mantive em mente durante esta longa jornada de pesquisa, e ao amor pelas gerações futuras que nos move; a todos que lutam pela vida na Terra.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente e imensamente a Deus, que me deu sabedoria, força e saúde, e permitiu que eu concluísse mais essa etapa acadêmica, guiando meus passos para a concretização deste sonho, há muito tempo desejado, mesmo diante dos diversos obstáculos enfrentados durante a pandemia da Covid-19.

Ao meu Companheiro André, por ser a pedreira onde atraquei meu barquinho, em segurança, na tempestade da pós-graduação. Por dividir com justiça, o cuidado dos filhos e do trabalho.

Ao meu orientador, professor Dr. Ricardo Folhes, por ter acreditado no meu potencial e me proporcionado a oportunidade de fazer parte de um Programa de Pós-Graduação tão importante quanto o PPGDSTU/NAEA, de referência nacional e internacional, além de ter compartilhado, generosamente, sua experiência e conhecimentos.

Ao professor Dr. Harley, que me orientou na formulação deste trabalho e a todas as professoras que encontrei durante a vida acadêmica, que me inspiraram a ser ainda mais focada e dedicada, especialmente a que me ensinou que “a noite é uma a criança” para as mães que pesquisam, dona Bea. Também ao meu colega do mestrado Cleyton, por ter me auxiliado com o processamento de dados e formulação de hipóteses.

Aos professores e professoras do Núcleo de Altos Estudos Amazônicos (NAEA), que se esforçaram para nos proporcionar o melhor acesso às aulas e aos conteúdos, diante de um contexto totalmente novo, desconhecido e, por vezes, assustador, no qual tivemos que nos adaptar a uma nova forma de vida e ao uso de plataformas de ensino à distância em razão da pandemia. Em especial, pela paciência com prazos, a partir dos problemas e limitações que a modalidade me causou.

Ao Movimento dos Pequenos Agricultores, na figura do coordenador regional do Norte, seu Ceará. Eu vim pra Universidade a perscrutar o que o Campo me contou.

Quiçá, evitar que se acentue mais (...)

“Jurema
É um pau encantado
É um pau de Ciências
Que todos querem saber

Mas quando eu falar em Jurema
Jurema
Eu dou Jurema a você

Mas se você quer Jurema
Eu dou Jurema a você!

Mas, se você quer Ciência
Meu nego
Eu dou Ciência a você”

Pau Encantado - Culto da Jurema em Pernambuco
Autor desconhecido

“Quem acredita em crescimento infinito em um planeta finito,
ou é louco, ou é economista”.
David Attenborough

RESUMO

A ideia de uma biotecnologia capaz de reduzir o uso de agrotóxicos no cultivo tropical de Soja *(Glycine max*) chegou ao mercado com um status “sustentável”, conquistando produtores com maiores produtividades e, por esta razão, lucratividades. No Pará, as promessas de entregar mais com o mesmo investimento, no entanto, não se mantiveram ao logo do tempo. Da resistência ao Glifosato à expressão de gene inseticida mutante (Cry1A.105), o nível da tecnologia atual entrega uma semente capaz de degradar herbicidas e eliminar populações inteiras de insetos, em teoria com menos insumos e igual qualidade no grão; teria ainda, este aumento na eficiência colaborado para preservar terras, como infere a hipótese de Borlaug (HB)? Por outro lado, esta intensificação biotecnológica poderia, paradoxalmente, aumentar a demanda pelo recurso, por forças de mercado, traduzindo-se em crescimento de área plantada e mais gastos com uso da Terra. Correlações positivas entre momentos de intensificação e crescimento área plantada foram encontradas, confirmando observações anteriores no bioma. Dada a complexidade das comodities e a conjuntura ao qual se inserem, explicar o aumento da pressão sobre o solo exigiu do escopo um avanço; da ideia do Paradoxo e da demanda de mercado para uma investigação da biotecnologia em si; o resultado gerou um modelo capaz de calcular o aumento da demanda direta sobre os estoques minerais do solo, em função da biotecnologia abarcada na semente. Explica-se a exploração da “energia mineral” das terras ao sul do Pará através de uma variável hipotético-dedutiva, em quilojoules, baseada na mecânica das leis da Conservação e da Ação de massas. As modelagens resultantes do processo de pesquisa deste trabalho trazem uma possibilidade de estimativa da demanda de energia extra por expressão de proteína exógena (DEEPE), e possível correspondência mineral na Deterioração do Ativo por Desmineralização (DAD), em diferentes cenários, como uma ferramenta para auxiliar produtores na escolha do tipo de cultura e de biotecnologia abarcada na semente; o que deixa de sair do bolso, sai de onde e a que preço? Há sustentabilidade, mesmo econômica, na trajetória biotecnológica da Soja no Pará? Por quanto tempo até o *esgotamento*?

Palavras-chave: Intensificação biotecnológica da soja; Cry1A.105; hipótese de Borlaug; DEEPE; DAD.

ABSTRACT

The idea of a biotechnology capable of reducing the use of pesticides in the tropical cultivation of soybeans (Glycine max) hit the market with a "sustainable" status and delighted producers, promising higher yields and, for this reason, profitability. In Pará, however, the promises of delivering more with the same investment have not held up over time. From resistance to Glyphosate to the expression of a mutant insecticide gene (Cry1A.105), the level of current technology delivers a seed capable of degrading herbicides and eliminating entire populations of insects, in theory with fewer inputs and equal grain quality; would this increase in efficiency also have helped to preserve land, as Borlaug's (HB) hypothesis infers? On the other hand, this biotechnological intensification could paradoxically increase the demand for the resource, due to market pressures, resulting in an increase in the area planted and more expenditure on land use. Positive correlations were found between moments of intensification and growth in planted area, confirming previous observations in the biome. Given the complexity of commodities and the context in which they are inserted, explaining the increase in pressure on the soil required a shift in scope; from the idea of the Paradox and market demand to an investigation of biotechnology itself; the result generated a model capable of calculating the increase in direct demand on mineral stocks in the soil, as a result of the biotechnology onboard the seed. The exploitation of the “mineral energy” of the lands to the south of Pará is explained through a hypothetical-deductive variable, in kilojoules, based on the mechanics of the laws of Conservation and Mass Action. The models resulting of these research process provide the possibility of estimating the demand for extra energy due to the expression of exogenous protein (DEEPE), and possible mineral correspondence in the Deterioration of Assets by Demineralization (DAD), at different scenarios, as a tool to help producers in choosing the type of crop and biotechnology onboards the seed. So furthering conscious choices through crucial questions; what comes out of the pocket, comes out of where and at what price? Is there sustainability, even economically, in the biotechnological trajectory of Soy in Pará? For how long is that before the foreseen exhaustion?

Keywords: Biotechnological intensification of soy; Cry1A.105; Borlaug’s Hypothesis; DEEPE; DAD.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Marcos temporais e regulatórios dos momentos de intensificação tecnológica da trajetória agrobiotecnológica da soja organizados em linha temporal (1995-2019) 36
Figura 2- Modelo conceitual para aplicação do balanço de nutrientes no monitoramento nutricional de sistemas de produção temporária em solos de fertilidade construída de Álvaro Resende.....43
Figura 3- Mapa dos solos majoritariamente ferrálicos do estado do Estado Pará 49
Figura 4- Mapa da Evolução da área plantada de soja em hectares por município do Pará em três períodos, de 2003 e 2023.....59
Figura 5- Representação molecular do cluster de uma ferredoxina redutora [2Fe-2S], com cargas. 102

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Evolução da área plantada de soja (em mil hectares) na região norte entre 1985 e 2022 58

Gráfico 2- Área plantada (mil hectares) e produtividade (kg/ha) da soja no estado do Pará entre as safras de 97/98 e 2022/2023 62

Gráfico 3- A evolução da produtividade da soja no Pará e na região norte (1985-2003). 64

Gráfico 4- Intensificação biotecnológica da produtividade (kg/ha) da soja no Pará ao longo dos anos (1997-2023). 65

Gráfico 5- Momentos de intensificação biotecnológica da soja e crescimento de área plantada e produtividade no Pará ao longo das safras (1997-2023)..... 67

Gráfico 6- Regressão Linear Da correlação entre as médias percentuais de produtividade versus área plantada no momento de IBtS seguinte 71

Gráfico 7- Regressão Linear da correlação entre as médias percentuais de área plantada versus produtividade no momento de IBtS seguinte 71

Gráfico 8- Momentos de intensificação biotecnológica da soja sobre a evolução da estimativa de gastos com fertilizantes na cidade de Sorriso-MT (2007-2023) 78

Gráfico 9- Momentos de IBtS sobre comparativo do custo por saca de soja (60 Kg) exigido pelo uso do solo e pela reposição de nutrientes..... 80

Gráfico 10- Média anual do preço da soja em Reais..... 81

Gráfico 11- Evolução da produção de soja no estado do Pará em sacas (60 Kg) 83

Gráfico 12- Receitas Brutas e líquidas da produção de soja no estado do Pará ao longo dos anos 84

Gráfico 13- Área plantada e AP reajustada e lucratividade reajustada da produção de soja no estado do Pará ao longo dos anos 85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Concentração de proteínas exógenas encontradas no peso seco de folhas e sementes de diferentes eventos transgênicos da Soja disponíveis no Brasil 38

Tabela 2 - Tabela de Testes T Student e Análise de covariância para as médias de crescimento entre os momentos..... 66

Tabela 3 - Médias percentuais entre um período de IBtS e outro para produtividade e a área plantada..... 69

Tabela 4 - Estimativa de desmineralização baseada no modelo de Variação mineral por hectare (δm/ha) em Ferro, a partir da extração de folhas (F) ou da exportação de Sementes (S), de acordo com o tipo de biotecnologia abarcada na semente 107

Tabela 5 - Deterioração do Ativo por Desmineralização de acordo com a correlação entre o número de moléculas de mineral e a expressão exógena admitida 109

Tabela 6 - Quantidades de ferro solúvel (DTPA e Mehlich) presentes em amostras de solos ferrálicos do Norte e Centro-oeste do País e média de ferro solúvel de solos do Pará..... 111

Tabela 7 - Estimativa de esgotamento pela deterioração do ativo por desmineralização em para dois diferentes cenários possíveis, em safras.....113

LISTA DE SIGLAS

ADEPARA	Agência de Defesa Agropecuária do Pará
CTNBio	Comissão Técnica Nacional de Biossegurança
CEPEA	Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
EFSA	Autoridade Europeia para a Segurança Alimentar
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FAO	Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ODS	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
ONGs	Organizações não-governamentais
ONU	Organização das Nações Unidas
MOS	Matéria Orgânica
NADPH	Fosfato de dinucleótido de nicotinamida e adenina

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 13
1.1 Do problema de pesquisa 17
1.2 Dos objetivos da investigação 19
1.3 Da hipótese de pesquisa 21
1.2 Da estrutura da dissertação 22
2 PRESSUPOSTOS TEÓRICO-METODOLÓGICOS 23
2.1 Temas da pesquisa 23
2.1.1 Sobre princípios teóricos e fundamentos para a sustentabilidade na Agricultura 23
2.1.2 Hipótese de Borlaug e Agrobiotecnologia da Soja 30
2.1.3 Limites da produtividade agrícola no âmbito da trajetória da IBtS 40
2.1.4 A energia do campo: Síntese metabólica de aminoácidos e proteínas exógenas 40
2.2 Técnicas de pesquisa 44
2.3 Instrumentos de coleta de dados e construção de Modelos 50
2.3.1 Marcos temporais da intensificação biotecnológica 50
2.3.2 Análise estatística 51
2.3.3 Modelagem 53
2.4 Limitações 54
3 DA HIPÓTESE DE BORLAUG AO LIMITE DA TERRA; SUSTENTABILIDADE ECONÔMICA DA INTENSIFICAÇÃO BIOTECNOLÓGICA DA SOJA NA AMAZÔNIA PARAENSE 55
3.1 A chegada da Soja no Norte 55
3.2 Momentos de Intensificação vs. área plantada 60
3.3 No limite da lucratividade; o ativo terra e a intensificação da reposição75
4 O FERRO PARA ALÉM DO GUSA: FISIOLOGIA DA SOJA BT SOBRE OS SOLOS VERMELHOS DO PARÁ 91
4.1 Evolução biotecnológica da soja “pronta para” resistir ao glifosato ao ataque de pragas 91
4.2 Demanda energética biotecnológica da SC1 no contexto do Pará 94
4.3 Deterioração do Ativo por Desmineralização 103

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS **114**
REFERÊNCIAS **121**
ANEXO A - Diagrama dos fluxos de massa das diferentes modelagens de produção de biomassa de acordo com Tang & Riley (2021) **147**
ANEXO B - Síntese de aminoácidos essenciais **148**

1 INTRODUÇÃO

Embalada pelo sucesso em superar a crise fúngica da monocultura do milho nos EUA na década de 70, a engenharia genética acabou inserida nos debates econômicos e de desenvolvimento através de uma “revolução”, gradativamente levando produtores rurais à adoção das chamadas cultivares *modernas* (GARLAND; CURRY, 2022).

Ao final da década de 90, a introdução da Soja “pronta para” resistir ao herbicida RoundUp® marcou o início de uma nova aposta da agricultura industrial. A transgenia, enquanto protagonista nas soluções tecnológicas dos problemas do setor, apresentava-se ao mundo prometendo a diminuição no uso de agrotóxicos e resultados agrícolas jamais vistos (SCHMITT; SOARES; SILVA, 2019).

A época coincidiu com o modelo de desenvolvimento desenhado para o Estado do Pará que, desde então, tem adotado uma política de incentivo à entrada e expansão da monocultura da Soja (ARAÚJO, 2021; ARAÚJO, 2014; SAUER, 2018).

Iniciando-se em 97, a monocultura da soja intensificou-se com a construção do porto da Cargill (2001), sendo impulsionada não somente pelo financiamento intensivo de estruturas de armazenamento e transporte de grãos (SAUER; PIETRAFESA, 2013), como também pelos surpreendentes resultados iniciais; produtividades acima dos 2000 kg/ha, em teoria, cultivados somente através de modalidades convencionais.

Desenvolvidas para resistir a um dos poucos herbicidas do mercado capazes de suprimir e homogeneizar o vigor da biodiversidade brasileira, as sementes resistentes ao glifosato protagonizaram pelo menos cinco safras de desentendimentos entre a produção clandestina do Rio Grande do Sul e o confisco do governo federal, antes da liberação comercial, em 2003 (DAROIT, 2007). No Pará, as sementes transgênicas encontraram um espaço puxado pela demanda, quando a Cargill iniciou a compra da produção, como reportado por Osório (2018). Naquele processo, uma agricultura tradicional de pequenas e médias propriedades acabou sufocada por um mercado que buscava “empurrar” insumos a todo custo; com novidades ano a ano, uns ficavam atentos às inovações e outros se sentiam lesados por não compreender a demanda, e o aumento dos custos com os novos produtos “inerentes” àquele modelo de produção (OSÓRIO, 2018).

No entanto, além da diversidade de ervas daninhas, o monocultivo da soja na Amazônia ainda tinha alguns problemas a superar. Ainda que a inovação tecnológica

facilitasse o manejo de plantas silvestres, os produtores reclamavam dos custos cada vez maiores com inseticidas, que acabavam por ser maiores que no plantio de soja comum (MENEGATTI; BARROS, 2007; OSÓRIO, 2018). A inovação biotecnológica então buscou a resolução; uma edição genética que tornasse a monocultura exótica extensiva capaz de resistir aos ataques da entomofauna, reduzindo a necessidade de defensivos. E, oportunizando aos novos cultivares “Bt” um status de soja sustentável, “amiga do ambiente” (RANJEKAR et al., 2003).

Desta forma, a segunda geração de sementes transgênicas da Monsanto, Intacta RR2 PRO™ (Soja “Bt”) foi liberada em território nacional (Parecer Técnico nº 2542-2010, CTNBio), em 2010. A Soja transgênica agora continha genes *Cry*, sintetizadores de protoxinas letais aos insetos desfolhadores. A Soja Bt diminuiu o uso de pesticidas em escala global (BENBROOK, 2012), aos primeiros anos de lançamento. No entanto, a partir da safra 2012/2013, lagartas do gênero *Helicoverpa spp*., já anteriormente reportadas como resistentes à toxina “Bt” (KAUR; DILAWARI, 2011) surgiram em níveis populacionais nunca antes registrados, ocasionando sérios prejuízos econômicos, principalmente nas culturas de soja, milho e algodão (JONES et al., 2019; TAY et al., 2013), ameaçando a produção e produtividade das culturas.

Desde então, a trajetória vem enfrentando dificuldades em repetir o sucesso da redução de uso de agrotóxicos vista ao lançamento da Soja Bt (OLIVEIRA NETO, 2016). No entanto, os depósitos de patentes de soja transgênica editada para resistir ao ataque de inseto refletiram um esforço contínuo em se superar as populações resistentes (MARINHO et al., 2012, 2014) e assegurar os níveis de produtividade da monocultura, com ou sem inseticidas. Após o *boom* populacional de *Helicoverpa spp.,* que ocasionou a emergência sanitária de 2013 por ser resistente e atacar preferencialmente as vagens da soja (SPECHT et al., 2013; TAY et al., 2013), novas cepas Bt “eco-friendly” foram estabilizadas (DURAIMURUGAN; DEVI, 2021) e disponibilizadas nas sementes de soja, em 2018.

Além dos danos econômicos, quedas de produtividade por unidade de terra põe em risco áreas de floresta anteriormente destinadas a preservação. Esta correlação é descrita dentro da hipótese de Borlaug onde, entende-se, quanto menor a produtividade e lucratividade do empreendimento, maior será o interesse em aumentar áreas cultivadas em detrimento das áreas destinadas para conservação (ANGELSEN; KAIMOWITZ, 2001; RUDEL et al., 2009). Neste sentido, a inovação

tecnológica e sua intensificação estariam facilitando a conservação e a sustentabilidade no bioma, dentro do Estado do Pará;

Atualmente, a semente transgênica ocupa mais de 98% da área plantada de soja no Brasil (SNA, 2022). Considerando que, indiretamente, o complexo da soja tenha contribuído em até 32% do total de desmatamento na Amazônia desde 2002 (RICHARDS; WALKER; ARIMA, 2014), surge uma dúvida sobre a capacidade da intensificação biotecnológica da soja em ter influenciado positivamente a preservação do bioma Amazônico, confirmando a Hipótese de Borlaug (HB).

A intensificação biotecnológica da soja (IBtS) apresenta uma tendência de aumento de produtividade da monocultura (COSTA; ROCHA, 2022). Com o aumento de produtividade e lucratividade espera-se um movimento de "*land-sparing*". Assim sendo, um aumento da produção de alimentos por unidade de área (produtividade), em terras agrícolas já existentes, dentro do contexto de lançamentos IBtS, teria minimizado a necessidade de novas terras agrícolas e ainda, liberado terras para conservação ou restauração de habitats (BORLAUG, 1972, 2002; PHALAN et al., 2016; PHALAN, 2018).

Este cenário já foi considerado verdadeiro quando do avanço da fronteira agrícola protagonizado pela soja, sobre o Cerrado (ASSUNÇÃO et al., 2015). Isto posto, esperar-se-ia que através das sucessivas atualizações tecnológicas da monocultura da Soja do Pará (2003-atualidade), houvesse significante preservação de áreas Agriculturáveis ou de Floresta nativa (*land-sparing*).

Neste sentido, correlações negativas entre aumento de produtividade e crescimento percentual de área plantada nos momentos de intensificação, poderiam ser esperadas. Desta forma, a preocupação inicial desse trabalho consiste em investigar se um possível movimento de intensificação biotecnológica da cultura da soja (2003-2023) esteve correlacionado com o crescimento em área plantada da monocultura dentro do Estado do Pará.

O segundo escopo de pesquisa deste trabalho parte do pressuposto de que, um aumento da eficiência (intensificação tecnológica) no uso de um recurso pode, paradoxalmente, aumentar a demanda sobre ele, ao invés de diminuir (MARTINE; ALVES, 2015), em razão da influência do mercado. Este fenômeno já foi comparado ao caso da terra por outros autores, num estudo sobre conversão de floresta nativa na Amazônia (COSTA; ROCHA, 2022). Um momento inicial de *land-sparing* com

posterior sobre avanço no bioma também (COSTA, 2023). Sem prosseguir na direção avaliar a conversão de florestas no Pará ou aprofundar o tema sobre competitividade de mercado, este trabalho se insere num escrutínio sobre a materialidade da eficiência na exploração do recurso, onde ela se traduz em funções de produtividade, para entender como e por que a HB, que se confirma num primeiro momento, acabaria por entrar em paradoxo, num segundo.

Da resistência ao Glifosato à expressão de uma proteína inseticida mutante, o nível de intensificação biotecnológica da soja atual entrega uma semente capaz de degradar herbicidas e proteger a planta contra mais de oito espécies de insetos diferentes (WANG et al., 2018;SILVA, 2013), com menos insumos e a mesma, ou até melhorada (HUANG et al., 2015) qualidade nutricional do grão; o aumento de eficiência segue uma lógica de se produzir mais (maior produtividade) com a mesma quantidade de recurso.

Neste sentindo, é preciso que, para além do momento em que a HB entra em paradoxo, alguns questionamentos sobre a sustentabilidade desta intensificação sejam levantados. Mais produtividade com menos insumo é um senso de eficiência biotecnológica construído dentro da (indústria da) engenharia genética e aceito pelas mesmas Ciências Agrárias que modelam limitações produtivas baseadas nos estoques minerais do solo (RESENDE et al., 2019). A propaganda de mais produtividade com o mesmo ou menor uso de insumo, sobre a mesma quantidade de área agriculturável (HB), vem se mostrado insustentável ao longo do tempo. Modelos de produtividade baseados na mecânica das leis da Conservação e da Ação de massas podem ser capazes de explicar e quantificar esta eficiência biotecnológica da exploração.

Sendo os mais acurados aqueles que consideram a síntese proteica (TANG; RILEY, 2021), na prática, ainda não existem modelos de produtividade referenciados inteiramente na expressão de proteínas exógenas[1]. Um modelo mais intrinsicamente relacionado à atividade metabólica e os estoques no solo pode ser capaz de responder às questões paradoxais revisitadas neste trabalho. Neste sentido, esta dissertação segue orientando-se pelo significado material do aumento da eficiência na exploração

[1] Proteínas exógenas são proteínas originalmente não-pertencentes ao genoma original de um organismo, i.e. transgênicas.

do recurso (solo) através da intensificação biotecnológica da soja, no contexto dos solos paraenses.

Esta dissertação busca ainda, propor uma variável qualiquantitativa capaz de regular a correlação entre a expressão gênica e a intensificação da exploração do recurso. Como resultado, além de uma quantificação em peso de micronutriente, persegue-se ainda uma ferramenta econômica capaz de prever o quanto se necessitará de insumo com tradução em valores reais, aproximando o produtor da análise de seu ativo imobilizado, com relação à deterioração de cada unidade de solo por safra, em razão na biotecnologia abarcada na semente.

Considerando a natureza permanente do ativo imobilizado em questão, e sua imprescindibilidade para manutenção das atividades normais de um estabelecimento rural, para concluir, apresenta-se ainda uma previsão de limite à continuidade das atividades, a partir do teor e do valor de um mineral específico, presente nos solos férricos do Pará. A identificação de um padrão de esgotamento por intensificação biotecnológica da economia rural no Estado pode vir a se tornar uma peça-chave para o planejamento do desenvolvimento agrário regional, esperançosamente, em futuro próximo.

1.1 Do problema de pesquisa

Em razão da necessidade de se manter altas produtividades e por causa de uma tendência intrínseca aos insetos, de desenvolver resistência, a trajetória da Agrobiotecnologia da soja em sua chegada à Amazônia vem diversificando o portfólio de defesa abarcado na semente. A semente transgênica que, incialmente sintetizava uma proteína capaz de degradar o glifosato, em um segundo momento passou a expressar níveis de Delta-endotoxinas capazes de controlar populações inteiras. Oriundas do bacilo entomopatogênico *Bacillus thuringiensis*, as toxinas decompositoras, agora expressas no reino vegetal, obtiveram sucesso na redução do uso de pesticidas e, em razão disto facilitaram um entendimento de sustentabilidade na monocultura. O sucesso na redução do uso de pesticidas não se manteve após o boom populacional de *Helicoverpa spp*. em importantes cidades produtoras do centro-

oeste (CONAB, 2016), o que se refletiu em uma constância do peso do pesticida no custo de produção.

A trajetória da agrobiotecnologia continua estabilizando novas cepas do bacilo enquanto seleciona expressões capazes de um controle eficiente. Mesmo genes mutantes como Cry1A.105 hoje estão estabilizados, e já compõe o portfólio de defesa da Soja Combinada I no Brasil, aprovada em 2018. Espera-se que a tecnologia abarcada na semente previna possíveis percas massivas, como ocorrido em 2013. Ainda, as altas produtividades garantidas por essas intensificações biotecnológicas, acredita-se, ainda desencorajariam o avanço sobre novas áreas no bioma amazônico; como inferira a Hipótese do ganhador do prêmio Nobel e precursor do melhoramento genético, Norman Borlaug (2002).

No entanto, a conversão de áreas em floresta, e o aquecimento do mercado de terras no bioma parecem seguir um caminho oposto. Segundo Almeida e Marin (2010), as estratégias seguidas pelo agronegócio são nada menos que parte da pauta política mundial, inclusive das agências multilaterais, especialmente a partir de um discurso intimamente relacionado à crescente necessidade de abastecimento alimentar (ALMEIDA, 2010, p. 102).

A presença de um processo considerado o imediato oposto à hipótese de Borlaug fora identificado para o bioma amazônico, por Costa & Rocha (2022) e Costa (2023). Quando o aumento da eficiência no uso do recurso, proporcionado pela intensificação biotecnológica, ao invés de reduzir a pressão sobre este, a aumenta, paradoxalmente, no caso específico da Terra, isto pode ser explicado pelas questões de mercado. Este paradoxo foi descrito para a eficiência do uso do carvão, no século XIX. Em estudos anteriores, identificou-se um aumento de conversão de floresta relacionado ao uso da soja transgênica (COSTA; ROCHA, 2022) e, quando esta representa maior competitividade, um aquecimento no mercado de terras em razão do aumento da demanda por terras (COSTA, 2023). A ocorrência Paradoxo de Jevons aplicado às questões da soja e da terra tem sido explicado por variáveis de mercado. No entanto, uma eficiência no uso do recurso pode estar resultando, em uma maior demanda; aqui, não somente sobre a commodity no mercado, mas, e aqui sem qualquer paradoxo, sobre os recursos minerais em si, utilizados para a expressão das proteínas exóticas cada vez mais diversas e complexas, a exemplo das abarcadas no portfólio de defesa da Soja Combinada I.

A IBtS, que permite a redução nos custos de produção através da transgenia de resistência ao glifosato e, ao ataque de insetos desfolhadores na cultura da soja, e que desta forma, também reduziria o uso de agrotóxicos, pode vir acompanhada de uma maior tolerância aos limites críticos de determinados nutrientes (SIQUEIRA; SIQUEIRA, 2018). Sabe-se que os limites críticos de tolerância à baixas concentrações de minerais no solo vêm sendo ampliados graças a agrobiotecnologia, no entanto por conta da fisiologia da planta, a demanda sobre alguns nutrientes como Fósforo (P) vêm aumentando, ao invés de diminuir (SIQUEIRA; SIQUEIRA, 2018; MARTIN; PIRES; VEY, 2022). Sabe-se que o nutriente mais escasso no solo dita o limite da produtividade (Lei dos Mínimos de Liebig, LLM). E, as funções de produtividade atual, apesar dos importantes passos dados na direção de funções que consideram a síntese metabólica, ainda encontram dificuldades para identificação das correspondências entre produtividade e extração de micronutrientes certos do solo, no caso específico da síntese de proteínas exógenas. A lucratividade da monocultura depende de que se consiga produzir com viabilidade, de modo que o gasto com a reposição destes nutrientes não comprometa a liquidez. Neste sentido, em uma situação hipotética de esgotamento dos estoques naturais do solo, a continuidade da atividade agrícola estaria ameaçada. Procura-se então dissertar sobre a sustentabilidade da intensificação biotecnológica da soja sobre os solos ferrálicos do Pará, a longo prazo.

1.2 Dos objetivos da investigação

O objetivo geral do trabalho é estudar a correlação do aumento da eficiência no uso do recurso solo por intensificação biotecnológica e os dois tipos de demanda a esta possivelmente associada; a demanda por mais terra nas áreas para plantio de soja estado Pará, que se refletiram no crescimento de área plantada e gastos com terra e, particularmente, a demanda gerada em função do pacote biotecnológico sobre o ativo imobilizado.

Desta forma, inicialmente, a cada momento de intensificação biotecnológica (2003-2010, 2011-2018, 2019 até o momento atual), objetiva-se identificar e descrever as correlações com o crescimento percentual esperado da monocultura, no período seguinte. Dito isto, este trabalho pretende, inicialmente, dissertar sobre a as seguintes

questões na região e espaço de tempo delimitados; O efeito da IBTS sobre a produtividade e a correlação da IBTS com crescimento em área plantada e as tendências encontradas, a partir das estimativas da CONAB (2023) para sojicultura no Estado do Pará. A fim analisar quaisquer tendências de *land-sparing*, faz-se necessário um resgate da produtividade no estado ao longo dos momentos de intensificação, e comparando-a com a área plantada. Objetiva-se, portanto, verificar se um aumento esperado de produtividade, associado aos eventos de liberação comercial que intensificaram a tecnologia, pode ter influenciado o crescimento em área planta (HB). Já no sentido inverso objetiva-se analisar se o aumento da produtividade poderia, em razão de forças de mercado, ter influenciado positivamente o crescimento em área da monocultura. Neste sentido, intende-se analisar historicamente a lucratividade bruta e liquida do setor no período, ainda que de forma estimada e a partir de outra localidade. Relacionando-se aos momentos de IBtS e a área plantada, busca-se dissertar sobre os resultados encontrados e os reportados anteriormente e entender as limitações da comparação da terra ao carvão (Paradoxo de Jevons).

Avaliando-se a tendência da economia do Agronegócio, em perseguir um superávit baseado na superexploração de vantagens comparativas naturais (DELGADO, 2013, p. 64), um outro objetivo específico é, a partir das vantagens comparativas minerais inerentes aos solos do Pará, semelhantes às encontradas na cidade de Sorriso-MT, identificar como e qual vantagem estaria sendo mais bem explorada, através do aumento na eficiência biotecnológica do uso do recurso. Neste objetivo específico, persegue-se identificar não somente uma correspondência entre a IBtS e a exploração mineral do solo, como também, propor modelos baseados na construção de biomassa, que estejam relacionados diretamente à expressão de cada uma das proteínas exógenas nas quantidades reportadas, para cada uma das três gerações de Soja transgênica da trajetória agrobiotecnológica. Considerando que, da lucratividade se deduz o custo de reposição, objetiva-se ainda, desenhar uma análise acerca da sustentabilidade econômica da atividade em função da opção da biotecnologia. Pretende-se construir um modelo que apresente, a depender da correlação adotada, a (1) liquidez aproximada ativo imobilizado em função da exploração mineral na IBtS, (2) o custo de reposição do mineral em Reais e (3) uma estimativa de esgotamento do mineral por IBtS, em safras.

1.3 Da hipótese de pesquisa

A hipótese central deste trabalho é a de que; o aumento na eficiência provocado pela intensificação biotecnológica pode, paradoxalmente, resultar, não somente em um aumento na demanda externa (mercado) refletida no aumento de área plantada, como também, em uma maior demanda interna, através da intensificação sobre o uso do recurso em função da expressão de proteínas exógenas, comprometendo a sustentabilidade econômica do setor, a longo prazo.

A início, infere-se que, entre as soluções desenvolvidas no processo de intensificação biotecnológica da soja (IBtS), pelo aumento significativo de produtividade e o crescimento em área plantada há algum tipo de correlação, como identificado por Costa & Rocha (2022) para o bioma amazônico.

Após cada avanço geracional de IBtS, se esta correlação for negativa espera-se um não-avanço ou, um avanço menos acentuado, em razão da alta produtividade e lucratividade prevista, relacionadas à nova tecnologia adotada, como infere a Hipótese de Borlaug.

Se as correlações forem significantemente positivas, espera-se encontrar, ainda que de forma generalizada, algum nível de influência sobre a Área Plantada em função do aumento da demanda externa; o aumento da lucratividade da atividade (IBtS) deve atrair mais investimentos, o preço da saca cai, mas a demanda sobre novas terras aumenta, pois, novos empreendimentos são atraídos, configurando-se um Paradoxo de Jevons. De acordo com este paradoxo, eventualmente, o aquecimento do mercado de terras mais do que compensaria a diminuição do avanço individual de cada empreendimento.

Desta forma, considerando que em um primeiro momento, a IBtS poupe áreas em cada empreendimento, em um segundo a demanda global por terra (e consequentemente AP) tenderia a subir, em razão deste aumento de competitividade provocado pela inovação tecnológica e, infere-se então, que o aumento de competitividade (produtividade) corresponde a um aumento da eficiência no uso do estoque mineral do solo.

A partir destas hipóteses, infere-se nos terceiro e quarto capítulos que, a intensificação biotecnológica da soja, ainda que num primeiro momento evite o avanço sobre novas áreas (HB) através de um aumento de lucratividade, acaba por acelerar

o esgotamento do recurso. O que, novamente, aumenta a demanda por terra (Área Plantada) em razão do aumento do custo de produção, e proporcional queda de lucratividade ocasionada em um momento posterior, pela necessidade de reposição sobre o ativo. A queda de lucratividade seria, por fim, um fator que empurra empreendimentos e, com isso, a própria trajetória agrobiotecnológica ao avanço sobre novas áreas, não somente em função das variáveis de mercado. Ao resolver os problemas da trajetória com uma inovação biotecnológica capaz de otimizar exploração do ativo imobilizado solo, à IBtS deve corresponder uma demanda energética possível. E a esta demanda, uma fonte de energia presente no solo, exaurível e a qual, através do investimento inicial, se pretende explorar. O limite da sustentabilidade econômica da agricultura baseada na IBtS se daria então, quando o mínimo necessário à cultura no solo fosse atingido (LLM); ao repor esta energia, em sua forma mineral, se deduz da lucratividade um custo, ao peso do mercado; que aumenta conforme a demanda pelo custo de reposição em questão.

1.4 Da estrutura da dissertação

A presente dissertação está organizada em 5 capítulos, incluída esta introdução, seguido de um capítulo destinado a expor os pressupostos teóricos-metodológicos, que apresenta as abordagens teóricas, os instrumentos e técnicas utilizados para investigação e contextualização do objeto de estudo, assim como as limitações encontradas no decorrer da pesquisa.

O terceiro capítulo se propõe a, num contexto de sustentabilidade proposto pela Hipótese de Borlaug, discutir os efeitos da IBtS sobre o crescimento da monocultura no Pará.

Em sequência, o quarto capítulo busca traduzir a codificação da informação biotecnológica presente no portfólio de defesa das sementes transgênicas em uma forma quantificável de “eficiência” de uso do recurso mineral do solo, parametrizado pelo micronutriente de reposição mais onerosa.

Por fim, em nível de considerações finais, no quinto capítulo apresentam-se as conclusões alcançadas a partir da pesquisa empreendida e sugestões construídas com base na reflexão acerca dos fundamentos teóricos, dados e resultados encontrados ao longo da análise.

2 PRESSUPOSTOS TEÓRICO-METODOLÓGICOS

Este capítulo constitui-se a partir das concepções teóricas norteadoras desta pesquisa, bem como dispõe acerca da análise dos dados utilizados como referência, e traz um resgate metodológico dos fundamentos utilizados nas modelagens sugeridas nesta Dissertação.

Este capítulo está divido em quatro partes. A primeira é a respeito do instrumental teórico e vem acompanhado de estudos e referências históricas dedicados aos quatro temas que, relacionados, constituem o objeto de nossa pesquisa; Agricultura Sustentável, Agrobiotecnologia da Soja, Hipótese de Borlaug e Limites do crescimento agrícola, no contexto da evolução biotecnológica da Soja e seu desenvolvimento no Pará. A segunda parte expõe o instrumental metodológico do tratamento dos dados, a terceira parte trata acerca da metodologia das modelagens e a última versa sobre as limitações encontradas no decorrer do processo.

Quanto às técnicas de pesquisa utilizadas, combinaram-se análise descritiva de dados disponíveis com interpretação qualiquantitativa que pode ser observada no Capítulo três, já no Capítulo quatro, variáveis qualiquantitativas foram testadas dentro de modelos criados a partir do método hipotético-dedutivo.

2.1 Temas da pesquisa

2.1.1 Sobre princípios teóricos e fundamentos para a sustentabilidade na Agricultura

Diretamente atribuídos a termos fundamentais para o estudo da Agricultura sustentável, conceitos como o da própria “Sustentabilidade” e o do “Desenvolvimento Sustentável” (DS) ainda se encontram mal compreendidos (DOVERS; HANDMER, 1992) e, em muitos casos, são tratados como sinônimos (MEBRATU, 1998; MENSAH, 2019; SARTORI; LATRÔNICO; CAMPOS, 2014). As abordagens dependem do campo de aplicação (engenharia, economia, administração, ecologia etc.), no qual cada ciência tende a restringir o escopo à apenas um lado da equação (CHICHILNISKY, 1996).

Para John Elkington (1994), criador do termo *Triple Bottom Line* (TBL, ou tripé da sustentabilidade), a sustentabilidade é o equilíbrio entre três pilares: ambiental,

econômico e social. A expectativa de que as empresas devem contribuir progressivamente para a sustentabilidade surge do reconhecimento de que os negócios precisam de mercados estáveis e devem possuir habilidades tecnológicas, financeiras e de gestão necessárias para viabilizar a transição rumo ao desenvolvimento sustentável (ELKINGTON, 2001). Assim, surge uma segunda visão, distinta da primeira: o DS é o objetivo a ser alcançado, e a sustentabilidade é o processo para atingir esse DS.

Para outros pesquisadores, o DS é visto como a manutenção dos processos ecológicos essenciais, a preservação da diversidade genética e a utilização sustentável das espécies e ecossistemas (TISDELL, 1988). O conceito de DS permanece contestado devido às diferentes posições sobre o que pode ser considerado justo (TODOROV; MARINOVA, 2011), no “socialmente justo” no tripé da sustentabilidade. Sua amplitude e aplicabilidade genérica tornam-no impreciso, o que leva a conflitos de interpretação (DOVERS; HANDMER, 1992).

Por outro lado, a sustentabilidade, de acordo com Ayres (2008), é um conceito normativo sobre como os seres humanos devem agir em relação à natureza e sua responsabilidade para com os outros e as futuras gerações. Sustentabilidade então pode ser analisada sob a ótica de dois níveis diferentes: sustentabilidade fraca ou sustentabilidade forte. A sustentabilidade fraca pode ser interpretada como a extensão do bem-estar econômico (AYRES; VAN DEN BERGH; GOWDY, 2001), onde o capital econômico produzido pelas gerações atuais pode compensar as perdas de capital natural para as gerações futuras (Fiorino, 2011). Assim, na sustentabilidade fraca, exige-se que o valor do capital natural seja preservado; por exemplo, no caso dos recursos não-renováveis, a extração deve ser compensada por um investimento em recursos renováveis substitutos de valor equivalente (SARTORI; LATRÔNICO; CAMPOS, 2014)

Em contrapartida, a sustentabilidade forte é um paradigma de não substituição, onde existem sistemas naturais que não podem ser corroídos ou destruídos sem comprometer os interesses das gerações futuras (FIORINO, 2011). Portanto, na sustentabilidade forte, é exigido que um subconjunto do capital natural total seja preservado em termos físicos, para que suas funções permaneçam intactas.

De acordo com Sartori, Latrônio e Campos (2014), no meio empresarial, tornou-se mais conveniente pensar na sustentabilidade como um "*Triple Bottom Line*".

Na década de 70, a crise da monocultura do milho dos EUA, dizimada por um fungo, abriu um contexto de inserção da engenharia genética nos debates econômicos, e de desenvolvimento (GARLAND; CURRY, 2022).

Em inglês, o mantra "*higher yelds, same input*" repetiu-se ao longo dos anos 2000 (CASTLE; WU; MCELROY, 2006; DE JONG; HOBBELINK, 1991; HUANG et al., 2004; MCLAREN, 2005). Opiniões como "A biotecnologia agrícola oferece uma oportunidade para desenvolver um futuro sustentável" e "dados sobre genes Bt sugerem maior produtividade (uso mais eficiente do mesmos insumos) e menor necessidade de uso de pesticidas" (McLAREN, 2005) faziam da biotecnologia praticamente uma varinha mágica (ZIEGLER, 2013).

Até 1982 não havia culturas transgênicas estabilizadas reportadas (BARTON; WHITELEY; YANG, 1987), quatro anos depois (1986) os primeiros organismos geneticamente modificados (OGMs) foram liberados em campo, na Inglaterra (COELHO; GRECA, 2005). Houve uma arguição sobre imprudência, que esbarrou em uma correspondência entre "justiça social" e a solução dos desafios do crescimento populacional mundial. Neste sentido, a justificativa utilizada para a liberação em campo dos primeiros OGMs acabou sendo endossada pela corrente ambientalista eco-tecnicista, que defendia a sustentabilidade da agricultura mundial por meio de soluções tecnológicas (PLUCKNETT; WINKELMANN, 1995).

A ideia de sustentabilidade da corrente ambientalista eco-tecnicista é aceita dentro de consensos internacionais sobre Agricultura Sustentável, notadamente justificados pelos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável da ONU (ODS). Dentro da meta 17, em especial, 17.11:

> "...ODS 17- Fortalecer os meios de implementação e revitalizar a parceria global para o desenvolvimento sustentável
> 17.11 - Aumentar significativamente as exportações dos países em desenvolvimento, em particular com o objetivo de duplicar a participação dos países menos desenvolvidos nas exportações globais até 2020" (ODS, 2023).

Aceita-se mundialmente como desenvolvimento sustentável a necessidade de "garantir, ou mesmo ampliar, sua capacidade de produção com sustentabilidade, ao mesmo tempo que atende à demanda global por segurança alimentar e nutricional como um grande exportador de commodities agrícolas" através da "modernização, tecnificação e inovação" culminando numa "agricultura sustentável digital"

(MASSRUHÁ et al. 2020). A corrente ambientalista que saiu em defesa da transgenia na década de 70, hoje apresenta-se na ideia de uma “agricultura digital”, que orienta o manejo através de dados em nuvem, enquanto promotora de sustentabilidade (MACPHERSON et al., 2022).

A expansão do agronegócio na Amazônia brasileira tem sido objeto de análise por parte de cientistas diversas de áreas, formações e matrizes de pensamento, além de ser alvo de diferentes agentes políticos, econômicos e sociais (STAEVIE, 2018).

No caso da expansão econômica da Soja no estado do Pará entre 1997 e 2023, esta dissertação buscou pressupostos teóricos iniciais em um momento do passado histórico, onde a crítica aos agrônomos das universidades e economistas pensadores da agricultura industrial chegou ao esgotamento do debate; vencendo a teoria que possibilitou à Revolução Verde pôr a prova a ideia malthusiana de progressões do crescimento populacional *versus* produção de alimentos.

Identificando um padrão de exploração e abandono de terras expandindo-se culturalmente entre os agricultores norte-americanos do século XIX, o “Pai da Química dos Solos” Justus von Liebig em uma só crítica uniu duas grandes áreas do conhecimento; Agronomia e Economia, atribuindo-lhes, à ocasião, o termo *Raubwirtschaft*.

Liebig desenvolveu a ideia desta “Economia do esgotamento” em uma profunda crítica da agricultura moderna, composta por uma série de cartas denominadas “*Chemische Briefe*” (Liebig, 1841-1878). Alguns processos desta economia baseados no cultivo ininterrupto e concomitante avanço sobre novas terras receberam termos pouco eufêmicos; pilhagem de nutrientes (verbrennlichen Stoffen), entre outros, utilizando-se do termo *Raubwirtschaft* a partir da carta 46;

> O fazendeiro americano rouba seu campo sem perder tempo; se não houver mais para ele, ele migra com seus cultivares para um campo novo, por dispor de terra suficiente e não ter tempo a perder (com a queda da produção) para exauri-lo. A agricultura intensiva moderna é um roubo circunstancial, o último estágio da economia do esgotamento. (LIEBIG, 1878b. p. 482)

A forma como o químico integra economicamente a importância da fertilidade dos solos à sua crítica da agricultura norte-americana ainda pode ser percebida na nota de rodapé desta passagem, ao comentar a queda de rendimento da colheita de certos estados dos Estados Unidos;

> O método geral de cultivo em todas as partes do país é tão defeituoso que torna o solo mais pobre de ano para ano; e se o poder produtivo natural do solo é continuamente reduzido, isto é um verdadeiro roubo praticado pelos indivíduos às custas na riqueza nacional" (LIEBIG, 1878b, p. 478).

Em outro momento, a crítica estende-se a agricultura moderna como um todo, e o modo como a cultura do agricultor não estaria preparada para as demandas do Capital. Liebig se refere a um agricultor de baixa escolaridade observando as consequências iniciais do abandono da agricultura de subsistência, para uma agricultura capitalista, de lucros e retornos capazes de oferecer uma vida suntuosa no campo. A este, Liebig se refere, mais eufemicamente do que o fora com os norte-americanos, como "agricultor empírico" e descreve sua falta de entendimento da questão da sustentabilidade econômica da agricultura na seguinte passagem;

> O agricultor empírico é um comerciante que produz carne e grãos; sem qualquer dúvida ele busca obter o máximo de lucro possível para seus campos, e ele considera que o processo é o melhor que lhe permite entrega os rendimentos na maneira a mais barata e no tempo o mais curto. E por que não deveria pensar assim, não é? Tem-se feito isso por séculos, e ele faz exatamente como aprendeu. Os que o precederam não perguntaram nada sobre o Campo, e quais efeitos seu método teve no campo - por que ele deveria perguntar sobre isso agora? Se ele conseguir ganhar a vida, um arrendamento ou os juros do seu capital e, além disso, adquirir títulos, então esta é para ele a única prova existente de que seu processo seja o melhor. Se seu trigo, trevo, beterraba ou as batatas em seus campos não crescem mais como de costume, então [...] ou foram as muitas tempestades no ano anterior, ou é alguma outra causa – em sua cabeça, apenas ele próprio ou seu método não pode ser a causa, é impossível uma vez que nada mudou nos últimos anos; o monte de estrume tem o mesmo tamanho de antes, e o campo dele parece igual ao normal. (LIEBIG, 1876b, p. 475)

A crítica contida no termo *Raubwirtschaft* foi direcionada em especial aos agricultores norte-americanos. Construída em um comparativo com os agricultores alemães, que até então preferiam respeitar o tempo do solo ao utilizar-se de rotação de culturas vegetais, em sistemas anuais que intercalavam plantio de pastagem e agricultura, pois o esterco de vaca garantia um certo nível de reposição de nutrientes. Liebig, porém, não ateve sua crítica somente ao sistema de roubo "grosseiro" norte-americano;

> O método de cultivo europeu, chamado agricultura intensiva, não é o saque bruto do agricultor americano, com o assassinato e a matança do campo, mas é um roubo mais sutil que você à primeira vista não vê que é roubo: É o roubo com autoengano, encoberto por um sistema de ensino ao qual ninguém percebe que falta, intrinsecamente, com a Verdade. (LIEBIG, 1876b, p. 481)

Das teorias da limitação produtiva do solo que, além da Química, unem a Economia e a Agronomia em um só campo, nasceram as principais estratégias da resolução de problemas fundamentais da reprodução social; amplamente debatidos à época das previsões catastróficas malthusianas sobre crescimento populacional e produção de alimentos. Liebig combateu não somente no campo das ideias, como no campo Cartesiano; nos debates, no laboratório e no campo as noções de inesgotabilidade e indestrutibilidade do solo de David Ricardo, amplamente disseminadas pela agricultura industrial (FOSTER; CLARK, 2018).

As ideias do “Pai da Química dos Solos” inspiraram não somente a invenção do fertilizante inorgânico que garantiu o sucesso da Revolução Verde (GARCIA; CARDOSO; SANTOS, 2013). O resgate da experiência do “agricultor prático”, ao qual Liebig se refere em antologia ao agricultor empírico, veio acompanhado da ideia de se executar atividades econômicas de forma *sustentável*, num contexto rural (Alles was eine Wirthschaft *nachhaltig* veräussern kann). Esta noção embrionária da sustabilidade na agricultura, presente na última das 50 Cartas sobre Química (Chemische Briefe) inspirou gerações de economistas e ambientalistas até o século atual e é aqui resgatada como referencial teórico inicial desta dissertação.

> Tudo pode ser uma economia pode vender de forma sustentável, é igual ao produto da atmosfera - um campo, do qual se qual toma, não sustenta o vigor ou fica mais forte [...] aí está base da Agricultura racional e de toda a sabedoria do Agricultor prático que a Industria deveria aproveitar. (LIEBIG, 1878b, p. 476)

A reposição dos nutrientes é um princípio fundamental da Agricultura Sustentável” (Liebig, 1878b pp. 476; Saito, 2020)”. Amplamente recomendada, a reposição de nutrientes é um fundamento básico da agricultura moderna, oriundo da química fundamental dos solos. Sem a reposição, a agricultura extensiva teria exaurido acres inestimáveis de terras brasileiras por onde andasse a fronteira agrícola, como o fez nos Estados Unidos. Não é exagero presumir que o “sistema de roubo” (Liebig apud Saito, 2020), poderia ter levado a uma grande fome mundial, e aumentado a temperatura do planeta a níveis que impossibilitassem a vida humana, como previra a física dos solos de Fraas (1957, p.357).

A preocupação de von Liebig com o ciclo natural de nutrientes, que inspirou importantes teorias do campo das ciências sociais e da ecologia, como a teoria da Falha metabólica (FOSTER, 2000), pode ser observada na seguinte passagem da coletânea “Chemische Briefe”;

> A vida dos seres humanos, animais e plantas está intimamente ligada ao retorno de todas as condições (Wiederkehr aller Bedingungen) que proporcionam o processo da Vida. O solo participa da vida das plantas através de suas partes constituintes; a fertilidade duradoura é inconcebível e impossível se as condições que o tornaram férteis não retornarem. (LIEBIG, 1878a, p. 451)”

Tida como fundamental contribuição do campo epistemológico das ciências sociais à ecologia, a teoria da “falha metabólica” transparece a dificuldade que a produção capitalista tem de devolver o consumo ao seu lugar de origem, em decorrência da separação antinatural entre campo e cidade. A partir da referência histórica Grundrisse (1858) houve, neste escrito, a construção de uma crítica à agricultura capitalista em dois estágios: (1) uma crítica à Thomas Malthus e David Ricardo, inspirada no trabalho de James Anderson sobre a teoria do aluguel de terras e (2) a consideração da segunda revolução da agricultura sob influência da química dos solos de Justus von Liebig, que levou o autor de Grundrisse a refletir sobre as condições para se estabelecer uma relação sustentável com a terra (FOSTER, 2000 p. 198). Segundo Foster (2000), o autor acreditava que todas as teorias da economia clássica anterior sofriam de falta de entendimento da química dos solos, ao que Liebig respondera com maestria. Esta referência aparece na discussão sobre uma “falha de metabolismo” no tópico “Gênese do aluguel do solo”, capítulo 47 do III livro da série Das Kapital (1894);

> […] a grande propriedade rural reduz a população agrícola a um mínimo em constante decréscimo, e lhe contrapõe uma população industrial em constante crescimento, amontada em grandes cidades; gera, com isso, condições que provocam uma insanável ruptura (unheilbaren Riss) no contexto do metabolismo (Stoffwechsel) social, prescrito pelas leis naturais da vida. Como resultado, a vitalidade do solo é delapidada, e esta fartura é transportada pelo comércio muito além das fronteiras de um determinado Estado (Liebig). (Das Kapital, MARX *apud* FOSTER, 2000)

Este processo de empobrecimento do solo levaria naturalmente a uma agricultura extensiva, pois os solos estão sendo exauridos. Sem a devida reposição

integral da vitalidade do solo, prevê-se um processo de Falha Metabólica. Por outro lado, uma aplicação de capital pode garantir acesso ao “caminho dos melhoramentos” (LAPIDUS; OSTROVITIANOV, 1944), que na atualidade compreende a compra de máquinas, insumos e um aumento de eficiência que compreende um período histórico de aumento da produção de alimentos, a chamada Revolução Verde.

> Um capital aplicado a um solo mais fértil dará sempre, sendo todas as outras condições iguais, um maior produto. Se os preços dos produtos da agricultura são determinados pelas despesas médias da produção, o locatário do 3.º terreno (mais antigo) está, portanto, destinado a receber um lucro inferior à taxa média. (LAPIDUS; OSTROVITIANOV, 1944)

O mecanismo da renda da terra permite a sua concentração, a valorização do solo, e a concentração da renda, conforme se vê destacado por Souza e Menezes (2019). Já um solo envelhecido, encontra na injeção de capital a possibilidade de continuar gerando riqueza, em um processo de Renda Diferencial de segunda grandeza (HARVEY, 1990). Desta forma, um solo as taxas de lucro de uma atividade rural onde, presume-se, são decrescentes, encontram, no processo de inovação tecnológica, uma continuidade paradigmática, como visto no tópico a seguir.

2.1.2 Hipótese de Borlaug e Agrobiotecnologia da Soja

A conjuntura agrícola mundial, onde o “homem que alimentou o mundo'” (HESSER, 2006) se insere e teoriza, foi fruto do processo de *economia do esgotamento* descrito por Liebig, seis décadas antes.

Durante quase um século, Norman Borlaug (1914-2009) desenvolvera uma lógica norteada pela ideia de que o melhoramento genético resolveria os problemas de fornecimento propagados pela escola malthusiana (ALBRECHT, 2024).

Da hipótese inicial teórica à prática, o ganhador do prêmio Nobel ficou mundialmente conhecido pelo melhoramento genético do trigo, pós-segunda guerra mundial (SANTANA, 2022). Segundo a hipótese de Borlaug (HB), quanto menor a produtividade e lucratividade da atividade econômica, maior seria o interesse em aumentar áreas cultivadas em detrimento das áreas destinadas para conservação (ANGELSEN; KAIMOWITZ, 2001; RUDEL et al., 2009).

A agricultura do início do século XX dos Estados Unidos, contexto ao qual o jovem Borlaug se inseria, assistia a quedas de produtividades e rendimentos cada vez

maiores (LIEBIG, 1878b, pp. 478-479). Borlaug demonstrava uma forte crença paradigmática em seu texto “The Green Revolution Revisited and The Road”. Ali, enfatizava a direção da inovação tecnológica na Agricultura, como uma tecnificação através da engenharia genética (SCHLOTTMANN et al., 2017 p. 344).

Defendida pelo mesmo, a chamada Revolução Verde é categorizada como um paradigma tecnológico. O paradigma seria então derivado da evolução dos conhecimentos da química e da biologia, que definiram uma trajetória tecnológica baseada no uso intensivo de insumos químicos (fertilizantes e pesticidas). (ALBERGONI; PELAEZ, 2007). De acordo com Albergoni & Pelaez (2007), a partir da década de 1970, o modelo produtivo em questão passou a apresentar alguns sinais de *esgotamento*, “cristalizados na identificação dos problemas ambientais ocasionados pelo uso intensivo de agrotóxicos e nos próprios limites de crescimento da indústria de insumos químicos”. Ainda de acordo com Albergoni & Pelaez (2007), o advento da biotecnologia possibilitou o surgimento de técnicas capazes de superar as barreiras genéticas existentes nas técnicas da revolução verde (seleção e melhoramento tradicional). Os autores fazem um questionamento que incita o desenvolvimento do trabalho citado; se estaria a biotecnologia sendo explorada para;

> “...a construção de um novo modelo tecnológico baseado na redução do uso de insumos químicos, ou se está representando uma continuidade da trajetória do paradigma anterior, a partir de uma estratégia de valorização de ativos das empresas do ramo químico”. (ALBERGONI; PELAEZ, 2007)

Trajetórias tecnológicas são *padrões de atividades que resolvem, com base em um paradigma tecnológico, os problemas produtivos que confrontam os processos decisórios de agentes concretos* na satisfação de suas necessidades de reprodução social, em contextos específicos nas diferentes dimensões (econômica, institucional e social (COSTA, 2014; DOSI, 2006, p. 22-23). Alguns autores já apontaram a agrobiotecnologia como pertencente a uma categoria de conhecimento do paradigma da Revolução Verde, em razão da tendência à uma continuidade “genética” do paradigma mecânico-químico (ALBERGONI; PELAEZ, 2007; FOLHES; FERNANDES, 2022). Neste sentido, utiliza-se a categorização trajetória “agrobiotecnológica”, como uma referência a (1) o padrão de escolhas efetuadas pelos empreendimentos e empreendedores rurais e (2) o curso da inovação tecnológica.

A história da Agrobiotecnologia confunde-se com a trajetória do desenvolvimento da tecnologia transgênica em si. A agrobiotecnologia consolidou-se como um ramo da biotecnologia que trata especificamente da inserção de informações genéticas microbianas dentro de culturas de interesse econômico (TENGERDY; SZAKÁCS, 1998). Após 20 anos de testes laboratoriais e campos experimentais, a Agrobiotecnologia chegou ao mercado ao final da década de 90; por um lado encontrando consumidores céticos e muitas vezes combativos na Europa e, por outro, desenvolvedores e utilizadores da tecnologia ávidos por sua aceitação (KALAITZANDONAKES, 2000).

A agrobiotecnologia baseada na engenharia genética de sementes, chave do curso do desenvolvimento dentro do paradigma mecânico-químico deste século (ALBERGONI; PELAEZ, 2007), direcionou as culturas no sentido de redução dos riscos envolvidos em se investir em produção de matriz natural (COSTA, 2015). No estado do Mato Grosso, a necessidade de garantir retornos impulsionou a agricultura de ciclo curto (culturas temporárias), possibilitando, flexibilidade no investimento do capital diante da fronteira econômica em expansão (Marques, 2018, p. 193). O modelo de ciclo-curto influenciou o início da seleção genética de cultivares na pesquisa biotecnológica brasileira (BONATO; LANGE; BERTAGNOLI, 2001).

Desta forma, era esperado que a biotecnologia agrícola aumentasse a produtividade do setor e carregasse práticas sustentáveis e ecologicamente corretas neste século (TENGERDY; SZAKÁCS, 1998). Da mesma forma, foi prevista a alteração da estrutura da agricultura, favorecendo os grandes complexos agrícolas modernos, que hoje podem ser observados no Pará (SAUER; PIETRAFESA, 2013; ARAÚJO, 2014; SAUER, 2018; ARAÚJO, 2021), entregando o controle aos produtores de novas plantas e animais transgênicos e mudando o status social da agricultura e sua dependência global. De acordo com Tengerdy & Szakács (1998), os prós e os contras da agrobiotecnologia deveriam ser pensados pois;

> "...a introdução de novas plantas, animais e práticas agrícolas poderia ocasionar alterações no equilíbrio ecológico na Terra, assim como o fez a Revolução Verde anterior, especialmente a introdução de monoculturas de alto rendimento, que alterou o equilíbrio ecológico, reduziu a diversidade, tornou as plantas vulneráveis a pragas e causou alternadamente explosões populacionais descontroladas e fomes." (TENGERDY; SZAKÁCS 1998)

Desde então, a estratégia do paradigma biotecnológico para melhorar a agricultura sempre se concentrou em perseguir a direção dos cinco elementos essenciais aos quais a Agricultura busca evoluir: Seleção de culturas, manejo do solo, manejo da água, manejo de pragas e preservação e processamento das culturas (TENGERDY; SZAKÁCS, 1998).

Neste sentido as bactérias, em especial os bacilos, têm sido fundamentais no melhoramento genético de plantas, com aplicações amplamente adotadas em várias áreas enquanto alternativas viáveis e ecologicamente corretas aos fertilizantes químicos sintéticos e pesticidas (DAME; RAHMAN; ISLAM, 2021).

Atualmente, códigos genéticos encontrados em bacilos são uma alternativa biotecnológica a ser inserida nas plantas de interesse agrícola para incrementar a tolerância ao estresse, a capacidade de biorremediação e até mesmo, de bioprospecção (ISLAM; RAHMAN; PANDEY, 2022).

No Brasil, o germoplasma da soja fora inserido na Bahia, ao ano de 1882, sem sucesso. Uma década mais tarde, novos materiais foram testados para as condições do Estado de São Paulo, com êxito relativo na produção de feno e grãos, e em 1900, no Rio Grande do Sul. A soja permaneceu como matéria-prima de forragem bovina ou como grão para o engorde de suínos, em pequenas unidades produtoras, e assim permaneceu, por 70 anos (1882-1950) (DALL'AGNOL, 2011). Somente na década de 60, com o melhoramento genético é que a Soja se tornou capaz de resistir à secura do Cerrado, ampliando o crescimento da trajetória sobremaneira, também em razão dos preços mais baixos da terra, no Centro-Oeste (DALL'AGNOL, 2011; ASSUNÇÃO et al. 2015).

De acordo com Siqueira & Siqueira (2018), o melhoramento genético da soja no Brasil tem buscado prioritariamente elevar potencial produtivo. Neste contexto, quando as cultivares de soja apresentam desempenho produtivo elevado, mesmo em condições de disponibilidade nutricional limitada, são classificadas como eficientes. Se não forem capazes de se desenvolver em ambientes tais, são consideradas ineficientes (SIQUEIRA; SIQUEIRA, 2018). Agrobiotecnologia da soja teve um papel sensivelmente relevante na chegada da monocultura na Amazônia, pelo Mato Grosso e em seguida pelo Pará. A tecnologia da semente selecionada geneticamente fora suficiente para garantir a produtividade no Cerrado, de modo que o Tocantins pode liderar o crescimento em área plantada na região, como demonstrado no Capítulo 3.

Já o crescimento escalado da monocultura no Pará (SAUER; PIETRAFESA, 2013), deu-se apenas após a liberação de cultivares transgênicos resistentes a aplicação do herbicida RoundUp®, subsequentemente reforçando o protagonismo da edição genética na resolução dos problemas da trajetória.

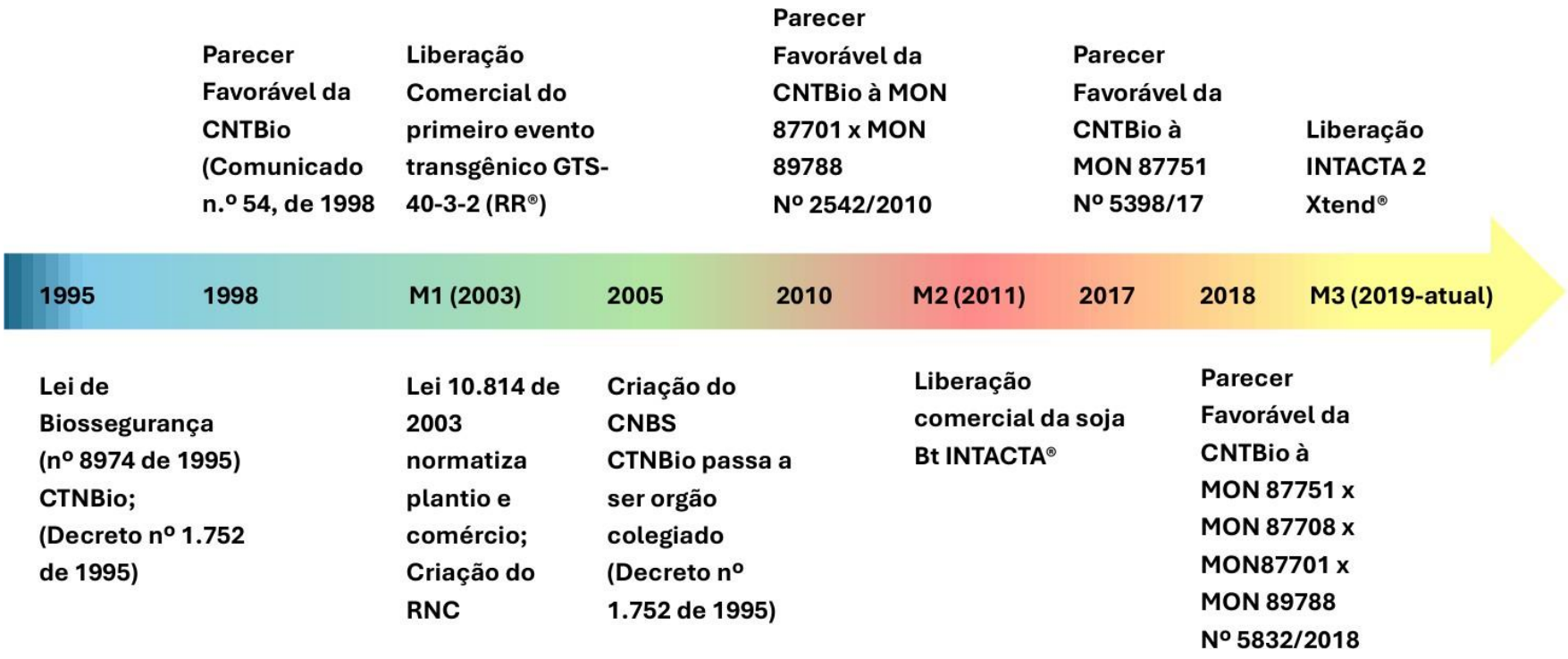
Em 2022, Costa & Rocha (2022) obtiveram um trabalho premiado pelo BNDES, ao identificar um padrão de efeito da agrobiotecnologia transgênica da soja em cima inclusive, do bioma Amazônico. Utilizando a base de dados de Mapbiomas 6, em um padrão de formato (pixel) que não foi possível a esta autora acessar, os autores identificaram uma correlação percentual em perca de área para cada tonelada de produtividade aumentada pela IBtS. Onde, a cada uma (01) tonelada de aumento na produtividade, uma redução de 5,7% na área de *Floresta Amazônica* foi provocada. O trabalho revisou, e contradisse a confirmação de Hipótese de Burlaug, obtida por Assunção et al. (2015).

No contexto do Cerrado, Assunção et al. (2015) identificaram a inserção de sementes de soja geneticamente adaptadas ao clima árido como intensificação tecnológica, avaliando se a novidade foi capaz de reduzir a pressão da Fronteira agrícola, encontrando respostas positivas entre as décadas de 60 e 80 – E confirmando a Hipótese de Borlaug. Neste caso, uma HB positiva significa que os produtores rurais de soja, com a intensificação agrobiotecnológica, experienciaram uma produtividade média maior por hectare, desencorajando o avanço sobre novas áreas.

As sementes de soja transgênica foram introduzidas, em teoria, apenas no Rio Grande do Sul, dois anos após a promulgação da Lei de Biossegurança (Lei de nº 8974 de 1995) (DAROIT, 2007; MELGAREJO, 2007). A partir da liberação comercial de RoundUp Ready® (2003), as gerações de tecnologia subsequentes parecem ter conseguido alcançar um platô de produtividade como será discutido no tópico 3.3. Entre 2003 e 2005 o governo federal normatizou plantio e comércio, criou o Registro Nacional de Cultivares, tornou a CTNBio um órgão colegiado sem a presença das empresas e capaz de avalizar a Liberação Comercial dos eventos e, instituiu a Comissão Nacional de Biossegurança. Um cenário progressivo de predomínio da tecnologia transgênica em detrimento da soja convencional vem se desenhando, até alcançar os mais de 98% da área plantada de soja, na atualidade (OLIVEIRA NETO, 2016; SNA, 2022). Consideram-se Momentos como a liberação da soja pronta para

resistir aos insetos (Bt) (2010), e a terceira geração de soja transgênica Soja Combinada I (SC1) (2018) como marcos da trajetória. A fim de facilitar a interação do leitor com estes momentos, a Figura 1 os posiciona dentro de uma linha temporal, junto às mudanças regulamentares citadas e as demais que os validaram.

Figura 1 – Marcos temporais e regulatórios dos momentos de intensificação tecnológica da trajetória agrobiotecnológica da soja organizados em linha temporal (1995-2019)



Fonte: Elaboração da Autora, a partir de pareceres técnicos publicados do site da CTNBio e da FAO.

Não é incomum que tecnologias sejam colocadas para funcionar antes que alguém de fato entenda o porquê de elas funcionarem (DOSI; NELSON, 2016). Dosi (1982) explica que as teorias da mudança tecnológica abarcam o processo em dois caminhos; teorias da mudança “puxada pela demanda” e, da “impulsionada pela tecnologia”. Neste contexto, quando o mundo debateu a necessidade de redução do uso de agrotóxicos “criou-se” a demanda para o desenvolvimento da Soja Bt. Deste então, a trajetória agrobiotecnológica vem se desenvolvendo no sentido de superar a tendência inerente aos insetos, de desenvolver resistência, com o passar do tempo (BUENO et al., 2021). Num processo mais “reativo” que protagonista (ABRITA et al., 2020) a adição e diversificação de proteína exógenas expressas marcaram a trajetória, a partir desta resposta à demanda do mercado.

Sabe-se que a soja transgênica entrega o mesmo teor de proteico e de nutrientes que a soja convencional, com baixa variância estatística (JOSE et al., 2020; LEVINE et al., 2019; VERTUAN et al., 2023). Para o Mato Grosso (OLIVEIRA NETO, 2016; SILVA et al., 2019) e em especial, para a cidade amazônica de Sorriso-MT, os gastos, não somente com fertilizantes, como também para agrotóxicos se assemelharam para ambas as culturas no espaço de tempo avaliado pela Conab (2016). Uma vez ausentes para o Pará, algumas das estimativas da Conab reportadas de Sorriso-MT foram utilizadas como parâmetro de referência para os custos de produção, em razão de algumas semelhanças; proximidade, localização na bacia amazônica, tipo de solo e pluviosidade semelhantes, mesma rota de escoamento de produção de grãos e de desmatamento provocado pela soja em território amazônico, até 2013 (ASKEW et al., 1970; BOY et al., 2018; FERNANDES; HACON; NOVAIS, 2020; GAMA et al., 2020; MARCUZZO et al., 2011; MIRANDA; SILVA, 2024). A produção de soja transgênica em Sorriso rendeu em média 1 saca de soja a mais por hectare do que a convencional, em 2016 (CONAB, 2016). Este resultado, no entanto, não se repetiu em nenhuma outra cidade reportada.

A partir disto, é possível a suposição de que, sob as mesmas determinadas condições, a soja transgênica entregue mais produtividade por hectare com o mesmo nível de investimento da soja convencional.

Considerando que, edições genéticas na soja para a resistência ao glifosato e ao ataque de insetos desfolhadores fabricaram uma espécie de adaptação ao bioma

amazônico, é possível esperar que a IBtS no Pará entregue mais produtividade/ha com o mesmo nível de investimento da soja convencional, como em Sorriso-MT. Pressupõe-se também, que o cenário se repita para o Pará, com o mesmo nível de investimento para soja transgênica e convencional. Desta forma, pressupõe ainda que a eficiência da Soja transgênica consista em estar “pronta para” produzir todo o portfólio de defesa presente e. g. na SC1, qual seja, na diversidade e concentrações reportadas por Naegeli et. al (2019) (Tabela 1), a partir da mesma quantidade de fertilizante, mais eficientemente aproveitando os nutrientes presentes no solo.

Tabela 1 - Concentração de proteínas exógenas encontradas no peso seco de folhas e sementes de diferentes eventos transgênicos da Soja disponíveis no Brasil.

Proteína exógena	*Evento Liberado comercialmente no Brasil*	*Concentração encontrada na Folha (R3-R6, estágio desenvolvido)*	*Concentração encontrada na Semente*
Cry1A.105	**MON 87751** x MON 87701 x MON 87708 x MON 89788	1,400 ± 490 µg/g (730 ± 2,600)	3.7 ± 0.94 µg/g (2.3 ± 5.7)
Cry2Ab2	**MON 87751** x MON 87701 x MON 87708 x MON 89788	22 ± 5.0 µg/g (12 ± 31)	2.7 ± 1.1 µg/g (1.2 ± 5.0)
Cry1Ac	**MON 87701** x MON 89788	2,100 ± 960 µg/g (920 ± 4,800)	7.7 ± 1.5 µg/g (5.9 ± 12)
DMO	MON 87751 x MON 87701 x **MON 87708** x MON 89788	23 ± 21 µg/g (8.3 ± 110)	13 ± 3.8 µg/g (7.7 ± 20)

CP4 EPSPS	**MON 89788**	320 ± 65 µg/g (220 ± 500)	100 ± 35 µg/g (54 ± 190)

Fonte: Adaptado de Naegeli et al. 2019

Recursos minerais são finitos e podem ser considerados, em termos econômicos, uma reserva natural do solo, de onde se obtém o *surplus* (LANG, 1924; MONERATO, 2021; SOUZA; SANTOS; MENEZES, 2019). Para o empreendimento rural, a reserva do solo configura se como ativo passível de exploração.

Onde, a continuidade da atividade agrícola depende da reposição mineral, como visto no tópico 2.1.1, e a rentabilidade é um dos pré-requisitos para que a intensificação resulte em *land-sparing* (HB), considera-se a queda da *lucratividade* de uma atividade econômica rural, como provocadora de um *passivo*, que seria o interesse em aumentar áreas cultivadas em detrimento das áreas destinadas para conservação (ANGELSEN; KAIMOWITZ, 2001; RUDEL et al., 2009).

Ainda, apesar dos estudos que afirmam que a trajetória vem aumentando a produtividade por unidade de área, a exemplo das 6 sacas/ha a mais prometidas na tecnologia Intacta®, “sem diferenças significativas relacionadas ao custo de produção” (VARGAS, 2013; GARCIA; RICHETTI, 2018; SILVA et al., 2019).

As taxas de lucro são influenciadas pelo aumento da produtividade e pelo custo de produção. A trajetória da agrobiotecnologia da soja tem conseguido responder aos problemas da monocultura porque, pode-se dizer que o melhoramento através de edição gênica superou a seleção genética de cultivares em termos de eficiência na exploração do recurso. Considerando o início do desenvolvimento da tecnologia transgênica, representado pela soja resistente ao glifosato e a geração atual, que compreende a Soja Combinada I, a trajetória da Agrobiotecnologia tem desenvolvido sementes capazes de expressões gênicas cada vez mais complexas, e em maiores quantidades. A eficiência, relacionada à capacidade de apresentar altas produtividades mesmo em condições de disponibilidade nutricional limitada (SIQUEIRA; SIQUEIRA, 2018) tem estado intrinsicamente relacionada com a capacidade da tecnologia de entregar mais com a mesma quantidade de inputs, e a tecnologia se desenvolve nessa direção. Entre (1) tolerar limiares mais baixos de certo nutriente no solo mantendo alta a produtividade e (2) sintetizar 2,100 µg de toxina inseticida por grama de folha com o mesmo custo de produção entregando 1 saca de soja a mais por hectare, como em Sorriso-MT, há um salto tecnológico significativo.

No entanto, se o custo do inseticida não se deduz da taxa de lucro (excetuando-se os royalties), e sua síntese na planta independe de um aumento de investimento em fertilizante, a eficiência da IBtS em campo se deduz de algum outro lugar.

2.1.3 Limites da produtividade agrícola no âmbito da trajetória da IBtS

Idealizador do movimento “free-market environment”, o economista Julian Simon (1932-1998) protagonizou largas discussões contra Paul Ehrlich, um ecologista também conhecido por suas previsões apocalípticas sobre os limites de ecossistemas naturais, na década de 70. Enquanto Ehrlich acreditava que qualquer espécie que se multiplicasse excessivamente estaria fadada à miséria, ou extinção, Simon defendia ideias como o desenvolvimento econômico ilimitado e a inexistência de problemas de escassez. Simon discordava das visões catastróficas do ecologista alemão, e entrou para história como ferrenho defensor do que hoje chama-se de “negacionismo climático”; Simon “não acreditava que as atividades humanas fossem a causa de problemas ambientais globais, como a destruição da camada de ozônio e a acidificação dos oceanos” (MARTINE; ALVES, 2015). Martine & Alvez (2015) resgataram o momento de uma famosa aposta dentro das questões ontológicas entre “tecnologia” e “verde” (LIEBER; ROMANO-LIEBER, 2014). Em 1980, Ehrlich e Simon fizeram uma aposta; Ehrlich acreditava em uma provável elevação do preço de algumas commodities, Simon acreditava que a tecnologia iria fazer o preço delas abaixar, assim testando suas concepções teóricas;

> Para Simon, os preços diminuiriam ao longo de dez anos e, evidentemente, para Ehrlich, haveria crescente escassez e subida dos preços. Em 1990, o pessimista perdeu a aposta, pois os preços dos minerais, assim como os do petróleo e dos alimentos, caíram na década de 1980 em função da crise internacional ocorrida no período. Contudo, a aposta não foi decisiva, pois, em anos posteriores, os preços das commodities têm flutuado significativamente. O desenvolvimento tecnológico e a descoberta de novos minerais certamente têm ajudado a aliviar a pressão sobre alguns recursos naturais escassos. Mas a questão mais relevante é se, e por quanto tempo, isso pode continuar, dado o Paradoxo de Jevons e os aumentos do consumo global.”(MARTINE; ALVES, 2015)

Willian S. Jevons (1835-1882) observou, em 1865, que a melhoria da eficiência no uso do carvão, ao invés de reduzir, elevou o seu consumo pelo setor industrial inglês. A inovação tecnológica direta e indiretamente estimulou novas atividades que

precisaram consumir mais matéria prima, paradoxalmente o avanço tecnológico resultou no aumento do consumo de recursos naturais (JEVONS, 1866). Erlich perdeu U$ 1000 para Simon, no entanto, a questão levantada por Martine & Alves (2015) continua; por quanto tempo?

O aumento da eficiência no uso do recurso que a Intensificação Biotecnológica da Soja proporciona poderia, em razão do aumento da produtividade e lucratividade, desencorajar o avanço sobre novas áreas agricultúraveis. Como infere a Hipótese de Borlaug, “ao produzir mais alimentos por unidade de área cultivada, mais terras estariam disponíveis para outros usos, incluindo recreação e vida selvagem” (BORLAUG, 1972). Por outro lado, se o aumento da produtividade encoraja novos players a entrar no mercado, isso gera um aumento na demanda sobre a commodity terra, resultando em um paradoxo.

Este paradoxo, identificado numa conjuntura industrial de motores à combustão de carvão, ao demonstrar que o aumento da eficiência no uso de um recurso não necessariamente leva à redução do seu consumo total, inseriu esta inovação num contexto econômico do século XIX sobre o consumo de recursos (JEVONS, 1866). Ao incremento da eficiência no uso no recurso que então, por fim, aumenta ao invés de diminuir a demanda sobre ele, pode ser chamado de “efeito Bumerangue” (ALCOTT; GIAMPIETRO; MAYUMI, 2012), pois, com o aumento da eficiência;

> Os lucros da atividade aumentarão, novo capital será atraído, o preço de vendas cairá, mas a demanda aumentará; e eventualmente, o maior número de [máquinas] mais do que compensará a diminuição do consumo de cada uma” (JEVONS, 1866, pp 124-125).

Esta passagem poderia ser facilmente substituída dentro de um contexto de mercado de terras. Sua decomposição inspirou a criação de importantes ferramentas para avaliação do paradoxo com relação à Terra, a exemplo do Índice de Jevons-Borlaug (COSTA, 2023) na atualidade. Os autores que relacionam o caso da terra com o paradoxo de Jevons entendem o aumento da produtividade em razão da intensificação biotecnológica como "aumento da eficiência no uso do recurso", pressuposto que também aqui se considera.

O professor Dr. Francisco Assis Costa (2023) desenvolveu um modelo para verificação de HB no contexto Amazônico ou, o que alguns autores consideram o seu imediato oposto, o Paradoxo de Jevons (PJ). O Índice de Jevons-Borlaug emprega

interpretação entre a intensificação produtiva e a demanda de terras, direta e indireta. Sendo a direta a variação na quantidade de terras necessária exclusivamente devido à mudança na produtividade agrícola, e a demanda indireta de terras uma variação na necessidade de terras que ocorre devido às mudanças na competitividade da produção agrícola, que por sua vez são influenciadas pela mudança na produtividade (COSTA, 2023). Este índice (IJB), é um indicador sensível à demanda por terra, sendo um indicador fortemente atrelado a variáveis de mercado.

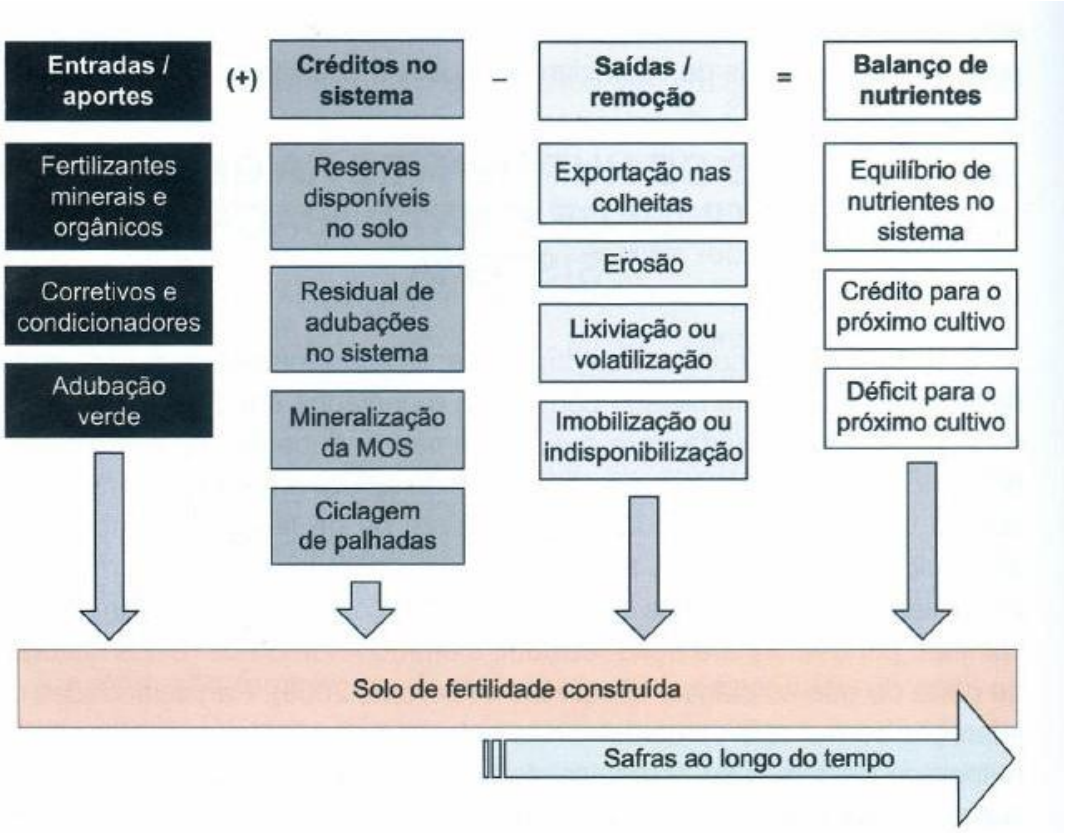
O aumento da produtividade já foi, no contexto amazônico, anteriormente entendido como derivado do uso de tecnologia transgênica (COSTA; ROCHA, 2023). Onde, entende-se, em razão da inovação a eficiência no uso do recurso está relacionada a capacidade da planta geneticamente editada de manter altas produtividades mesmo sob as condições amazônicas (diversidade de ervas daninhas e de insetos desfolhadores), com a mesma quantidade de insumos da forma convencional. Deste modo, em razão do aumento desta eficiência a lucratividade pode ser aumentada, pois a trajetória passa a economizar com herbicidas e inseticidas. Este pressuposto pode considerar uma maior eficiência no uso de fertilizantes em razão da edição genética ou outras adaptações do pacote tecnológico e.g. como inoculante (LI et al., 2014). As edições genéticas estabilizadas para a soja já permitem a absorção de micronutrientes como o ferro de forma melhorada (SHAHEEN et al., 2024; VASCONCELOS et al., 2006).

A Agronomia Brasileira considera a construção química da fertilidade de um solo a etapa inicial, e base indispensável para que a intensificação no uso da terra seja bem-sucedida em ambiente tropicais (RESENDE et al., 2019). Neste sentido, os solos são corrigidos para que as reservas minerais mínimas sejam alcançadas e possam ser exploradas. Desta forma, o Solo de fertilidade construída passa a atuar como reservatório de nutrientes (RESENDE et al., 2019).

Após a exploração deste primeiro momento, o solo precisa então ser restabelecido de suas capacidades produtivas repondo-se, a partir de análises de solo e cálculos de extração ou “funções de produção”, as quantidades mínimas necessárias às altas produtividades de uma cultura como a da soja (THOMAS; COSTA, 2010). Em razão do seu fator limitante à produção, a reposição de nutrientes possui força de lei (Lei dos mínimos), e representa um peso positivo no balanço de nutrientes de um ativo solo (Figura 2). É importante ressaltar que a reposição dos

nutrientes, ou seja, o gasto com fertilizantes, também vem representando o maior custo percentual na produção da soja, em importantes cidades produtivas do Brasil (OLIVEIRA NETO, 2016).

Figura 2- Modelo conceitual para aplicação do balanço de nutrientes no monitoramento nutricional de sistemas de produção temporária em solos de fertilidade construída de Álvaro Resende.



Fonte: Extraído de Resende et al. (2019)

Resende et al. (2019) apresentaram uma modelagem LLM (Lei dos Mínimos de Liebig) para a reposição de nutrientes da soja baseada na concentração aproximada no produto (grão/palhada). Dentre as variáveis consideradas no cálculo de reposição de nutrientes, ressaltam-se; (1) a extração, que se dá pelo acúmulo de determinado nutriente no tecido das plantas e (2) a exportação, que diz respeito à quantidade que efetivamente sai do sistema através do produto colhido. A partir dos valores equivalentes à extração de macro e micronutrientes para cada tonelada de produto colhido, para as diversas culturas reportadas por Resende et al. (2019) o ferro é o micronutriente sendo explorado em maior quantidade; 375g por tonelada de grão de soja extraída e 65g por tonelada exportada.

Anteriormente, outras modelagens LLM de produtividade consideravam até mesmo a escolha dos produtores em efetuar a reposição de nutrientes no momento certo, a fim de maximizar o investimento financeiro (KREUZ et al., 1994; LANZER; PARIS; WILLIAMS, 1981). O modelo de Lanzer et al. (1981), apesar de antigo, pode ser considerado acurado quando comparado a outros, por considerar interações entre micronutrientes, temperatura e pluviosidade (TANG; RILEY, 2021). Estas são interações de segunda ordem na limitação produtiva.

Mais de uma dezena de funções de produção podem ser encontradas na literatura para explicar a resposta de plantações ao uso de insumos. O estado atual do conhecimento neste campo de estudo na agricultura compreende conceitos e variáveis biomoleculares. As funções de produtividade mais acuradas têm se apresentado como as que consideram não somente um mínimo de nutrientes necessário, como também as interações entre os micronutrientes, e as condições edafoclimáticas. De acordo com Tang & Riley (2021), as modelagens de produtividade baseadas na LLM seguem a mecânica elementar da Lei de Guldberg-Waage. A Lei de Guldberg-Waage trata da velocidade das reações químicas; a chamada lei da ação de massas. Segundo Tang & Riley (2021), a forma mais apropriada de interpretar esta mecânica dentro da previsão de produção de biomassa, portanto de produtividade inclui a consideração do modelo proposto por Kooijman (1998).

O modelo de Kooijman, comumente referenciado como *SU-model*, considera a limitação da produtividade dentro de uma perspectiva de disponibilidade de micronutrientes no espaço intracelular. A ideia de “unidades sintetizadoras”, pode-se dizer, supera a ideia de mínimos possíveis através da concepção da lei da ação de massas; se há mais micronutrientes disponíveis no espaço da unidade sintetizadora, haverá maior produção de biomassa. Pressupõe-se então, que modelos inspirados na ideia de unidade sintetizadora apresentem uma forma mais precisa de se avaliar; (1) o limite da produtividade e lucratividade da cultura da soja e (2) a eficiência na exploração do recurso mineral do solo. No tópico a seguir, tais modelos, leis e regras de natureza bioquímica são revisitados de maneira mais aprofundada.

2.1.4 A energia do campo: Síntese metabólica de aminoácidos e proteínas exógenas

Do lado de fora da menor unidade funcional de um organismo vivo, a célula, todas as moléculas tendem a se comportar conforme a segunda lei da termodinâmica;

com o tempo, e consequente o aumento de energia do sistema, propendem ao caos, prevalecendo a entropia.

Do lado de dentro da célula, o tempo e o aumento da energia dentro de um sistema vivo deixam de ser um fator desorganizador. Até um certo ponto, o aumento da temperatura dentro do espaço microscópico acelera as reações químicas. Da mesma forma, a velocidade das reações pode ser acelerada pela concentração dos reagentes ali presentes. Esta regra de concentrações e velocidades é conhecida como Lei da Ação de Massas.

A Lei da Ação de Massas, ou Lei de Guldberg-Waage, introduzida no século XIX por Cato Guldberg e Peter Waage, é fundamental na compreensão da cinética das reações químicas. Esta lei afirma que, para uma reação elementar (que ocorre em uma única etapa), a velocidade da reação é diretamente proporcional ao produto das concentrações dos reagentes em quantidade de matéria (mol/L), potencializado pelo número corresponde à quantidade de cada componente da reação (BROWN et al., 2005; ATKINS, 2006).

A lei de Guldberg-Waage também foi explicada enquanto “a mecânica” por trás de modelos capazes de predizer a produção agrícola (TANG; RILEY, 2021). Essa mecânica está presente nas equações matemáticas derivadas do enunciado da Lei dos Mínimos (LLM) de Justus von Liebig;

> “Cada campo contém um máximo de um ou mais e um mínimo de um ou mais nutrientes. As colheitas guardam relação direta com esse elemento no mínimo, seja ele cal, potássio, nitrogênio ou outro nutriente qualquer. É o fator que governa e controla o tamanho e a duração das colheitas” (MALAVOLTA, 2006 p. 540).

Diversas funções de produtividade costumam orientar o uso de fertilizante com base no nutriente mais escasso no solo. O excesso de um nutriente não supre a falta do outro, mas limita a produtividade da cultura em razão de sua ausência (MALAVOLTA, 2006 p. 544).

Mitscherlich (1909) descreveu a predição de colheitas através de uma função logarítmica onde a produção era potencializada por fatores tais; dose adubo, reserva do solo e coeficiente eficácia do adubo. Modelos posteriores, mesmo concorrentes ao do criador do Super Fosfato Simples (o adubo inorgânico de alta eficiência de Liebig), trouxeram atualizações como absorção, transporte e redistribuição de nutrientes

(HOAGLAND, 1944). Da escola de Hoagland vieram modelos como a combinação da hipótese do carregador de íons com a teoria da união da enzima e substrato, quantificadas pela equação de Michaelis-Menten (EPSTEIN, 1972), que explica a cinética enzimática, na busca por aproximar os cálculos matemáticos da expectativa e realidade. A partir de então, todas as atualizações passaram a considerar os processos metabólicos das plantas na síntese de biomoléculas.

Dentre estes, o modelo de Unidade Sintetizadora (SU) de Kooijman (1998) para a predição da construção de biomassa, se apresentou de forma acurada em testes com algas, quando comparado a outros modelos estritamente matemáticos ou químicos (TANG; RILEY, 2021). De forma simplificada, o modelo conceitual de Unidade Sintetizadora (SU) considera uma SU como “enzima ou um complexo de enzimas que se liga a uma molécula de substrato para gerar uma molécula de produto ou um conjunto de moléculas de produto” (KOOIJMAN, 1998). Neste sentido, a Lei da Ação de Massas seria a mecânica por trás da reprodutibilidade do modelo porque a concentração de substratos presentes em contato com a SU rege a velocidade com a qual a biomassa é produzida, sendo a probabilidade estatística de um substrato encontrar a SU compreendida no processo de Poisson.

Posicionada dentro da cinética enzimática, a produção de biomassa (e previsibilidade da produtividade) também seria influenciada pelas teorias e leis das biomoléculas, além da Ação de Massas. Isto significa que a eficiência (quantidade de biomassa sintetizada em um tempo x) na síntese da “matéria prima” de todas as proteínas, a molécula de aminoácido, também é influenciada pela energia disponível no sistema – no espaço intracelular, ou citosol. A energia das reações enzimáticas de produção de aminoácidos não-espontâneas vem de catalisadores como a Acetilcoenzima A, e os nucleotídeos de adenina NADPH, FADH e ATP.

Dentro da usina de força da célula vegetal, o cloroplasto, da glicólise, do ciclo do ácido cítrico ou da via das pentoses-fosfato originam-se os aminoácidos, cujas ligações ou quebra delas ocorrem ao custo do consumo de pelo menos três moléculas diferentes de energia. Para iniciar a quebra de glicose, a glicólise consome 2 ATPs. Todos os aminoácidos são produzidos pelas plantas e bactérias e, aos animais cabe complementar, na dieta, aminoácidos que não podem sintetizam. No Anexo B é possível observar alguns processos de síntese de aminoácidos essenciais em bactérias. O modelo SU de Kooijman (Anexo A) considera que, quanto mais substrato

(biomoléculas pré-sintetizadas e energia) para a reação, mais rápido será produzida a biomassa. E, portanto, maior a eficiência.

Além dos aminoácidos, uma outra teoria da escola de Hoagland sugere que os 2ATPs necessários à glicólise podem ser gerados através do gradiente eletroquímico formado entre os dois lados da membrana interna mitocondrial, ao utilizar a energia do NADH e $FADH_2$. Esta teoria, a teoria quimiosmótica de Mitchell (1961) sugere, portanto, uma ordem de importância e de liberação energética nos processos celulares, ressaltando a importância dos nucleotídeos e dinucleotídeos de adenina no processo.

Os nucleotídeos de Adenina (NADH, NADPH) são moléculas carregadas de energia que, uma vez utilizadas, são recarregáveis através de uma outra “linha de transmissão elétrica” molecular. Alguns autores se referem a este com um pequeno “cabo de força”, que não somente inicia a cadeia de transporte de elétrons (energia) de fora para dentro do estroma (lado de dentro do cloroplasto), como é a principal fonte de energia para a recarga e produção de novos NADPH; a ferredoxina (2Fe-2S) (BARTEK et al., 2010; HANKE; MULO, 2013) (Figura 5), através da redução NADP+. NADPH é o nucleotídeo de Adenina diretamente ligado à construção (anabolismo) de aminoácidos.

Esta pequena molécula composta por dois átomos de Ferro, dois de Enxofre e envolta por quatro Cisteínas é praticamente um interruptor e uma tomada de energia, ao mesmo tempo. Sua atividade carrega a energia que altera o gradiente eletroquímico do cloroplasto que favorece a formação de ATPs (teoria quimiosmótica) e recarregando NADP+. Inicialmente acreditava-se que todo o ferro da Ferredoxina seria férrico (Fe3+) e que as ligações e propriedades eletroquímicas deste micronutriente seriam as responsáveis pela energia contida na molécula (BLOMSTROM et al., 1964). Posteriormente, as propriedades eletroquímicas do ferro se confirmaram, descobrindo-se, no entanto, que energia da Ferredoxina reduzida (carregada) compreende um elétron armazenado em uma das moléculas de Fe+2, que oxida a Fe+3 (KHETKORN et al., 2017).

A chave da força da síntese de biomassa está localizada dentro da usina de força da célula vegetal, o cloroplasto. A síntese de proteínas exógenas relacionadas ao controle de insetos que compreende o cerne da tecnologia transgênica “Bt” encontrou nesta organela a força necessária para o sucesso em níveis de expressão

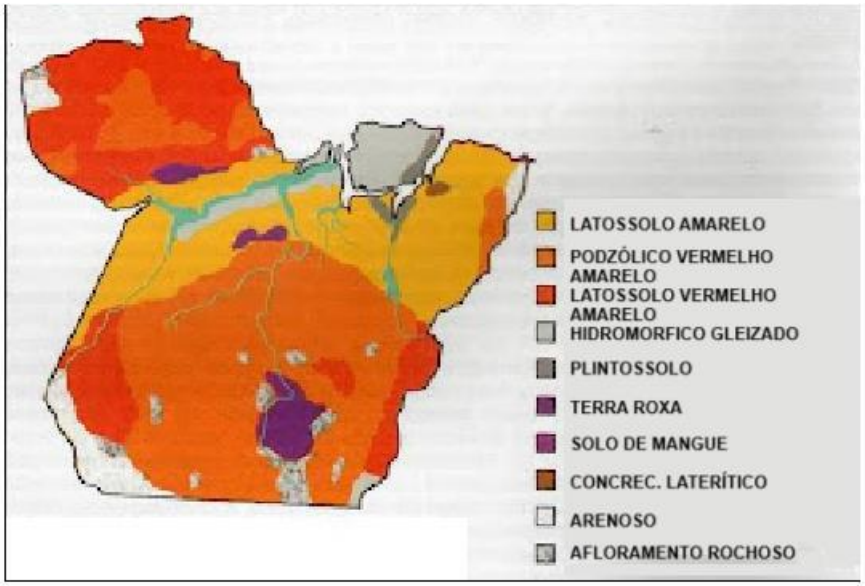
gênica. Inicialmente na trajetória, o gene Cry da bactéria *Bacillus thuringiensis* (Bt) fora introduzido dentro do núcleo da célula vegetal. Isto tornou a célula capaz de sintetizar a toxina, mas em níveis insuficientes para controles populacionais nas proporções necessárias (±0,2–1% do total de proteína solúvel). Para alcançar níveis satisfatórios, o gene Cry fora introduzido diretamente dentro do cloroplasto , em uma operação portanto “transplastídica”. A síntese de delta-endotoxinas nesta organela, outrora ±0,2–1% (Cry em inserida no núcleo) passou a representar 5% do peso total de proteína (solúvel, TSP) uma vez dentro da usina de força da célula (SANAHUJA et al., 2011). Ao aprimorar a tecnologia dentro do cloroplasto, De Cosa et al. (2001) aumentaram a expressão do gene Cry dentro (do código do cloroplasto) da célula vegetal do tabaco, que passou a expressar delta-toxina até quase a metade de todo o peso proteico das folhas, 46%. Em 2004 esta tecnologia foi estabilizada nas sementes de soja (DUFOURMANTEL, 2004), e hoje está presente em eventos comerciais amplamente difundidos na trajetória (acima de 70% do mercado de sementes e. g. INTACTA RR2; NOVAES, 2017).

A importância do Ferro na cultura da soja é em si só um tema para um tópico inteiro e, é aqui considerada a partir da perspectiva da clorose por deficiência de ferro. Esta patologia ocorre quando a planta não recebe o suprimento adequado de ferro especialmente na sua fase de crescimento. As folhas apresentam uma coloração amarelada e a planta tem a sua produtividade afetada. A doença não é comum no Brasil em razão dos estoques de ferro do solo, no entanto, o melhoramento genético da Soja já estabilizou a expressão de genes que expressão redutores de ferro quelado (FRO2) oriundos do juazeiro (*Arabidopsis thaliana*) a fim de ampliar a absorção (VASCONCELOS et al., 2006). Tal tecnologia dificilmente compreenderia uma necessidade adaptativa para a cultura no Pará, onde um único hectare de solos vermelhos paraenses pode conter cerca de 9.340 kg de ferro apenas do tipo “solúvel” (4.67 ± 2.8 g/dcm³) (FERNANDES et al. 2018).

Os solos vermelhos paraenses possuem, em sua composição, altos teores de Ferro e alumínio, sendo, portanto, chamados de solos ferrálicos e compreendem mais de 80% do território do Estado (GAMA et al., 2020) (Figura 3). A partir desta perspectiva, extrapolando os conceitos utilizados dentro dos modelos e teorias aqui revisitadas, neste trabalho considera-se (1) o Ferro como uma fonte de energia essencial para a formulação de biomassa, pois; (2) quanto mais Ferro disponível para

absorção mais Ferredoxina será sintetizada e (3) Quanto mais Ferredoxina disponível, mais energia livre para a síntese de aminoácidos das proteínas exógenas transplastídicas.

Figura 3- Mapa dos solos majoritariamente ferrálicos do estado do Estado Pará.



Fonte: Adaptado de Vieira et al. (1971) *apud* Torres (2009).

2.2 Técnicas de pesquisa

Levando em conta a proposta deste estudo, de avaliar os efeitos da IBtS tanto sobre o crescimento da monocultura no Pará (produtividade, área plantada e taxa de lucro), quanto sobre a deterioração do ativo mobilizado (quantificação da eficiência na exploração do recurso mineral), optou-se por adotar a técnica da análise descritiva de dados para a primeira etapa e, criou-se uma modelagem SU potencializada por uma variável químico-genético-biomolecular, de peso hipotético-dedutivo, para se obter uma estimativa em reais de deterioração.

A coleta de dados estatísticos tem crescido muito nos últimos anos em todas as áreas de pesquisa, especialmente com a era da Informática. Ao mesmo tempo, olhar uma extensa listagem de dados coletados é insuficiente para construção de conclusões, especialmente para grandes conjuntos de dados, com muitas variáveis sendo investigadas (REIS; REIS, 2002). A Análise Descritiva é a fase inicial deste

processo de estudo dos dados coletados. Utiliza-se métodos de Estatística Descritiva para organizar, resumir e explanar os aspectos importantes de um conjunto de características observadas, ou para a comparação de tais características entre dois ou mais conjuntos de dados. Como afirmado por Reis & Reis (2002), “as ferramentas descritivas são os muitos tipos de gráficos e tabelas, e também medidas de síntese como porcentagens, índices e médias”.

Segundo Meneses e Favreto (2021), o método hipotético-dedutivo desenvolvido por Karl Popper deixa de lado o método no qual a ciência começa pela experienciação para adotar um método pela qual a ciência começa do problema a ser formulado, antes mesmo de quaisquer experiências. Portanto a observação não é o ponto de partida de uma pesquisa, mas o problema (MARCONI; LAKATOS, 2010) da mesma.

2.3 Instrumentos de coleta de dados e construção de Modelos

A instrumentalização da coleta de dados se deu, a princípio, com o levantamento e análise documental (CELLARD, 2012) sobre os atos normativos de liberação comercial da tecnologia da Soja transgênica, seguido da realização de levantamento de dados de área plantada e produtividade da base da CONAB (2023), estatísticas de custo de produção também da Conab e dados sobre o crescimento do preço da saca do CEPEA (2023), além da revisão bibliográfica.

2.3.1 Marcos temporais da intensificação biotecnológica

A indústria bioquímica emplacou a liberação da terceira geração de sementes transgênicas, que no caso da soja, tem como principal representante a Soja Combinada I (MON 87751 × MON 87708, e ainda MON87701 × MON 89788), uma combinação de resistência herbicidas e expressão de inseticidas derivados e não derivados da toxina Bt.

A três gerações de Soja transgênica no Brasil estão representadas em períodos que compreendem os anos de 2003 a 2010, de 2011 a 2018 e de 2019 a 2023. Para o estado do Pará, a transformação de uso do solo constante na base de dados da plataforma de alertas de desmatamento com imagens de satélite de alta resolução “MapBiomas” referente a estes períodos, em dados agregados, serviu de base para a

criação de mapas técnicos correspondentes ao aumento de área plantada de soja. Os mapas foram desenvolvidos pelo LAENA - Laboratório de Análises Espaciais, da Universidade Federal do Pará.

De acordo com os pareceres técnicos nº 2542-2010 e 5832/2018, os momentos de intensificação biotecnológica possíveis para o estado do Pará compreendem os períodos da liberação inicial, (1) da soja resistente ao Glifosato (2003), (2) da adição da tecnologia Bt (2010) e (3) da diversificação do espectro de toxinas e de resistência herbicidas da soja convencional I (2018).

No que se refere à pesquisa documental, a importância da obtenção de dados por meio de fontes em arquivos e documentos, dá-se, conforme aponta Yin (2001), em razão da sua abrangência sobre a coleta de informações qualitativas e quantitativas, como “dados numéricos (informações quantitativas) [que] em geral são muito importantes e encontram-se disponíveis para um estudo de caso” [e os] dados não numéricos (informações qualitativas)” (YIN, 2001, p. 111-112), de caráter fundamental.

Neste sentido, foram identificadas e analisadas leis e atos normativos que normatizaram a evolução da tecnologia transgênica no Brasil para definir os anos de lançamento das tecnologias por um lado, e por outro, artigos de autores que citam a adoção da tecnologia por produtores no Pará.

A partir da ótica do pesquisador, uma base de dados pode ser filtrada e os eventos importantes, das variantes e das hipóteses a serem testadas, podem devidamente alocados em sua série para análise (CELLARD, 2012).

2.3.2 Análise estatística

Dentro da análise descritiva a estatística descritiva dos dados apresenta uma derivação da interpretação do que se obtém a partir de uma avaliação inicial dos dados. Para que um estudo estatístico produza resultados fiáveis é necessário cumprir diversas etapas: a identificação do problema, o planeamento do estudo, a recolha de dados, a apresentação dos dados e a sua análise e interpretação (SANTOS, 2007).

A identificação da intensificação tecnológica para o estado do Pará foi calculada em um modelo relativamente mais simples do que o de Costa & Rocha (2022) para o bioma Amazônico. A consideração da IBtS fora baseada em momentos de aumentos significativos de produtividade e constância da mesma. Um movimento de

Intensificação Biotecnológica da Soja (IBtS) no Pará potencial fora categorizado de acordo com quatro espaços de tempo correspondentes à liberação comercial (iniciando-se no ano em que a tecnologia fora legalizada) das novas tecnologias de soja transgênica no mercado brasileiro. São estes, M0 (1996-2002) como “ausência de tecnologia transgênica no estado”; M1 (2003-2010) Liberação da Biotecnologia de resistência ao Herbicida glifosato, RoundUp Ready®; M2 (2011-2019) Liberação da tecnologia de resistência a insetos Bt, Intacta®; M3 (2019-até o momento atual) Terceira geração de soja transgênica, Soja Combinada I.

A partir das estimativas reportadas pela Conab (2023), dados sobre a produtividade média para os períodos foram confrontados com os dados sobre a área plantada no período estudado, para o estado do Pará. Testes T Student (significância >0.05) foram executados entre os períodos 1996 a 2002 v.s. 2003 a 2010 e entre 2003 e 2010 vs. entre 2011 e 2019. Desta forma, diferenças estatisticamente significativas entre as produtividades médias dos períodos descartariam o efeito do acaso.

Em seguida, para avaliar se o momento de intensificação biotecnológica foi capaz de interferir na tendência de aumento de área plantada, as médias percentuais de crescimento de produtividade e de área plantada foram calculadas a fim de verificar se o crescimento médio percentual de produtividade de um período afetou o crescimento médio percentual em área plantada, no momento seguinte. O caminho oposto também foi avaliado. Fora calculada a correlação de Pearson (p) entre as médias das diferenças percentuais da produtividade de um período e a média das diferenças percentuais da área plantada no período seguinte, e vice-versa. Neste sentido, duas hipóteses foram testadas; Hipótese 1: a produtividade influencia a área plantada no período seguinte. Hipótese 2: Área plantada influencia a produtividade no período seguinte. A correlação em Regressão Linear, entre os percentuais para as duas hipóteses, também fora calculada.

Para análise da reposição nutrientes (fertilizantes), da variação da lucratividade da cultura e do crescimento do arrendamento de terra (Renda dos Fatores) as estimativas da série anual da Conab (2023) para a cidade Sorriso-MT foram utilizadas, em razão da ausência de estimativas reportadas para quaisquer cidades paraenses no relatório em questão.

O preço estimado da saca ao longo dos anos foi calculado em uma média anual, a partir da base de dados do Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA – Esalq/USP).

2.3.3 Modelagem

As modelagens propostas foram criadas a partir de mecânicas correspondentes às leis físico-químicas que tratam da transformação de nutrientes.

O modelo apresentado no capítulo quatro considera que, a menor fração de produção de biomassa, qual seja, o aminoácido, somente é sintetizado a partir da disponibilidade de moléculas “carregadoras de energia” (ADP, ATP, NADP, NADPH etc.)(AMEND; SHOCK, 1998) através da transferência de seus respectivos potenciais energéticos em quilojoules, além da “matéria-prima”, os nutrientes e micronutrientes disponíveis no substrato (KOOIJMAN, 1998).

Que cada aminoácido possui uma unidade de média de matéria com relação ao seu peso molecular, pesando em média 110 daltons (GARNER; GARNER; SPECTOR, 1979), e que cada molécula de proteína ou toxina é composta por n aminoácidos. E que a variação da energia livre padrão (ΔG) de uma reação química é a quantidade de energia liberada na conversão dos reagentes em produtos, em condições padrão (GRITZNER, 1977).

Que a constante de Faraday (F, F= 96,485C/mol) entra em uma relação entre potencial redox (E), energia livre de Gibbs (ΔG) e o número de elétrons transferidos (n), cuja fórmula é: $\Delta G = -nFE$ (HUANG et al., 2015). Ainda, que a matéria fora de um sistema vivo tende ao caos (Entropia) e dentro, à biossíntese (Entalpia).

Ainda, que a constante de Avogadro é uma constante física fundamental capaz de corresponder ao número de entidades elementares (átomos, moléculas, íons, radicais, elétrons, fótons etc.) existentes numa mole da substância considerada, com o valor de $6{,}02214179 \times 10^{23}$ (FERNANDES, 2015).

Considera-se ainda, que Massa molar do ferro (Fe), identificável na tabela periódica dos elementos, equivale a 56 g/mol.

Por fim, a ideia geral dos modelos propostos fundamenta-se numa lógica elementar às ciências naturais, comum tanto ao conceito de matéria – tudo que tem

peso e ocupa espaço no tempo – como ao de energia; não se perde, nem cria; toda a matéria e energia se transforma.

2.4 Limitações

Dentre as limitações enfrentadas no decorrer do desenvolvimento da pesquisa, destacam-se:

a) A inexistência de estimativas para as cidades produtoras do estado do Pará por parte dos dados reportados pela Conab;
b) a imprecisão quanto à trajetória biotecnológica percorrida por cada cultura na Pesquisa Agrícola Municipal (PAM) do senso agropecuário do Brasil;
c) a inespecificidade de determinados custos de produção dentro do Censo, em comparação às estimativas da Conab;
d) e a indisponibilidade dos dados da trajetória para o estado do Pará dentro da plataforma da Agência de Defesa Agropecuária do estado (ADEPARÁ).

Dentre as limitações do próprio modelo desenvolvido podemos citar; a necessidade de se atrelar a decodificação genética, a fim de relacionar com exatidão os aminoácidos expressos com as suas respectivas rotas metabólicas e energia demandada correspondente; e uma correlação mais específica em termos de fixação do micronutriente estudado em razão da expressão das tecnologias correspondentes à IBtS.

3 DA HIPÓTESE DE BORLAUG AO LIMITE DA TERRA; SUSTENTABILIDADE ECONÔMICA DA INTENSIFICAÇÃO BIOTECNOLÓGICA DA SOJA NA AMAZÔNIA PARAENSE

O presente capítulo compreende uma análise descritiva do processo de desenvolvimento biotecnológico da soja e o crescimento da monocultura na Amazônia paraense. A intensificação, através das soluções transgênicas, é correlacionada com as estimativas disponíveis de produtividade e área plantada no Estado, evidenciando tendências em momentos de inovação. Disserta-se a respeito da influência dos momentos de intensificação biotecnológica sobre o crescimento em área plantada no Pará. Analisa-se a trajetória dentro do contexto vivenciado nos últimos 20 anos, posicionando-a contra ideias de *land-sparing* e as ditas paradoxais, como o aumento da pressão pelo recurso. Explicita-se limites da lucratividade da atividade; linkando a sustentabilidade econômica da monocultura à intrínsecidade da biotecnologia em sua trajetória no Estado.

3.1 A chegada da Soja no Norte

De acordo com a hipótese de Borlaug (HB), quanto menor a produtividade e lucratividade por hectare, maior será o interesse em aumentar áreas cultivadas em detrimento das áreas destinadas para conservação (ANGELSEN; KAIMOWITZ, 2001; RUDEL et al., 2009). Pode-se considerar que esta sentença explica, de forma simplificada, as observações sobre o processo de esgotamento de solo e, por esta razão, o avanço sobre nova áreas, cunhado no termo *Raubwirtschaft* de Justus von Liebig para agricultura norte-americana do século XIX (1878).

A ideia de Borlaug encontra um sentido semelhante ao ser construída por outro caminho, cuja síntese atribui-se o termo "*land-sparing*". Qual seja, a de que "um aumento na produção de alimentos por unidade de área (rendimento) nas terras agrícolas existentes, teria o potencial de minimizar a área agrícola e poupar terra para conservação ou restauração de habitat" (PHALAN et al., 2016).

Num contexto de atividade econômica de base agrária a se desenvolver sobre um dos mais importantes biomas do planeta, onde exige-se um mínimo de 50% de reserva florestal na área no empreendimento, torna-se extremamente atrativa a ideia

de produzir mais e menos espaço, e com isso poupar áreas para conservação. Outra ideia bastante atrativa reflete a necessidade de se diminuir os gastos com defensivos, através de um cultivar capaz de produzir seu próprio inseticida (Soja Bt)(BROOKES; BARFOOT, 2015). De acordo Lerayer (LERAYER et al., 2011), um estudo feito pela Consultoria Céleres apontou que, entre 1997 e 2008, a adoção da biotecnologia no Brasil contribuiu com a redução de 12,6 bilhões de litros de água na agricultura, economizou 104,8 milhões de litros de óleo diesel, e que houve uma redução na emissão de 270,4 mil toneladas de CO2, decorrente da diminuição do uso de maquinário, “o que representaria a preservação de dois milhões de árvores de floresta ripária”.

Neste sentido, a introdução das sementes transgênicas, iniciada em teoria apenas no Rio Grande do Sul no ano 97, ainda que clandestinamente (DAROIT, 2007), teria se traduzido num considerável avanço em preservação de áreas Agriculturáveis ou de Floresta nativa (*land-sparing*). Isto pois, a intensificação tecnológica, protagonizada pela engenharia genética da monocultura nas últimas décadas, representou um aumento significativo de produtividade (COSTA; ROCHA, 2022), e uma redução de custos que corresponde a uma maior *lucratividade*. O Evento GTS-40-3-2 (MON 89788), embora desenvolvido por pesquisadores brasileiros em parceria com a Monsanto, fora primeiramente utilizado na Argentina em 1996, com alguns agricultores introduzindo-a no RS para a safra de 1997 (BROOKES; BARFOOT, 2015; DAROIT, 2007). Somente registrado no Brasil em 2003, o evento MON 89788 deu às sementes de Soja (*Glycine max*) uma poderosa característica, capaz de favorecer a maximização dos rendimentos através da homogeneização dos campos com herbicida RoundUp® (glifosato), ao qual a transgenia garantiria resistência. Este ano de 1997 também coincidiu com a retomada da soja na região Norte do país. Experiências iniciadas em Tocantins e Rondônia, em 86, não perduraram até a safra de 90. Somente em 1997, o plantio da soja fora retomado na região Norte de forma significante, com o crescimento em área novamente puxado pelo Tocantins, a partir de 2003. Ali, Rondônia também retomo o crescimento em área plantada da monocultura sem, no entanto, conseguir superar o crescimento em área plantada no Pará (Gráfico 1).

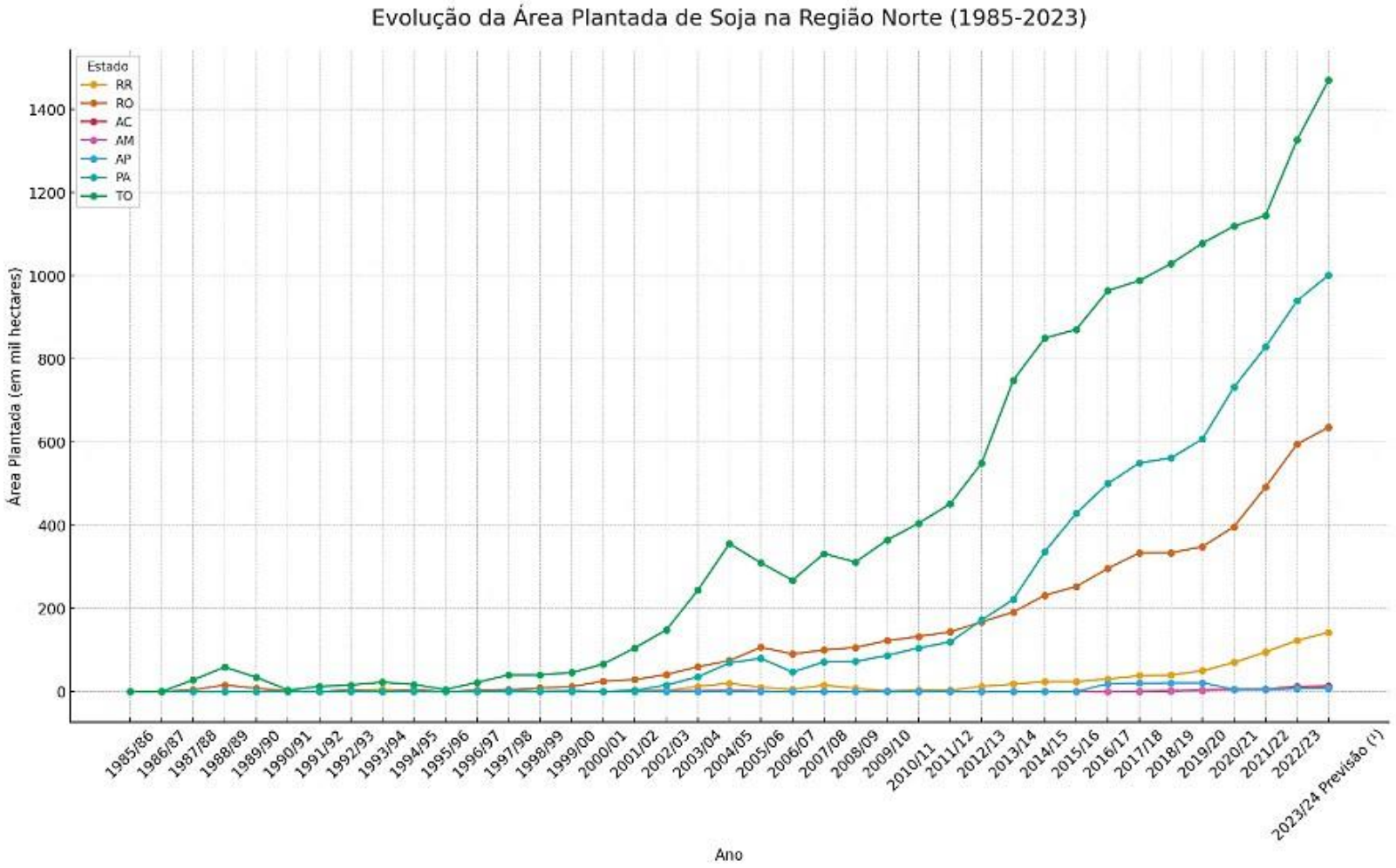
Entre 1997 e 2023, a área plantada com soja estado do Pará cresceu, em termos percentuais, aproximadamente 38419.23%. Durante os dois decênios que

compreendem 2003 a 2023, O crescimento em área plantada para o Pará foi de 2569.03%. De acordo com as estimativas da Conab, durante o mesmo período, a área plantada cresceu em 900.00% e 444.62% para os estados de Rondônia e Tocantins, respectivamente. Ainda de acordo com as estimativas da Conab, atualmente o estado do Pará possuiria mais de 900 mil hectares plantados com soja, Rondônia em torno de 650 mil hectares e o Tocantins, mais de 1.6 milhões de hectares de área plantada. Já de acordo com a comunicação feita por meio digital pelo Estado do Pará, somente na cidade de Paragominas a Agência de Defesa Agropecuária do Estado do Pará (ADEPARÁ) registrou mais de 600mil hectares plantados, conforme trecho abaixo;

> Segundo a ADEPARA, Paragominas é o maior produtor de soja do Estado, com 234 unidades produtivas. A área plantada é superior a 600 mil hectares, que produzem cerca de 600 mil toneladas, representando quase 24% da produção paraense. Hoje, o Pará ocupa a 13ª colocação na produção nacional de soja, com mais de 2,5 milhões de toneladas, o equivalente a 1,75% da produção brasileira. (AGÊNCIA PARÁ, 2024)

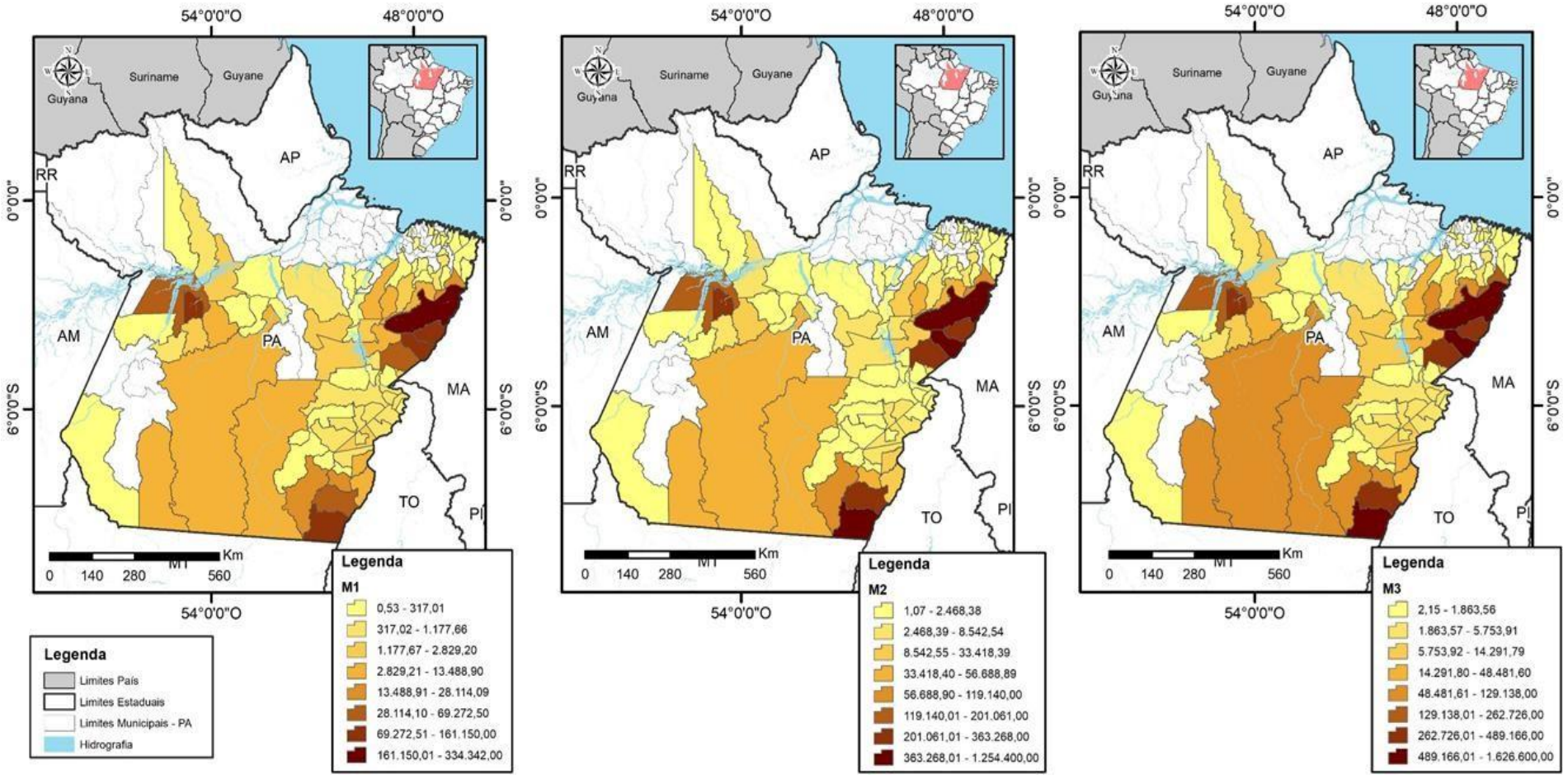
As informações mencionadas pela Agência Pará não estão disponíveis ao público, por parte da ADEPARÁ. A produtividade e a área plantada mencionadas pela agência são incompatíveis com a estimativa da Conab para o Estado. Nesta perspectiva apresenta-se categoricamente a maior dificuldade encontrada durante este trabalho, na aproximação da análise com a realidade; a falta de dados oficiais e a divergência de informações. A dificuldade na obtenção de dados precisos sobre a cultura da soja no estado também pôde ser constatada a partir dos dados de uso do solo (Land_Use) da plataforma MapBiomas. Os parâmetros de conversão de terra na monocultura, em dados agregados, geraram os seguintes Mapas de Área Plantada no estado do Pará, desenvolvidos no âmbito desta dissertação, pelo Laboratório de Análises Espaciais do Núcleo de Altos Estudos Amazônicos (Figura 4). Os Períodos analisados compreendem os anos de 2003-2010 (M1), M2 (2011-2018) e M3 (2019-2023).

Gráfico 1- Evolução da área plantada de soja (em mil hectares) na região norte entre 1985 e 2022.



Fonte: Elaboração da Autora, criado a partir de dados da Conab (2023).

Figura 4- Evolução da área plantada de soja em hectares por município do Pará em três períodos, de 2003 e 2023.



Fonte: Elaboração do LAENA, criado a partir de dados processados pela autora, a partir do MapBiomas.

Com destaque para Paragominas (1.626.603ha), Dom Eliseu (832.558ha) e Mojuí dos Campos (489.166ha), na ordem encontram-se outros seis municípios com rápida expansão da trajetória nos períodos estudados e mais de cem mil hectares de Área Plantada na atualidade, por ordem de grandeza; Ulianópolis (448.485ha), Santa Maria das Barreiras (378.625ha), Rondon do Pará (368.451ha), Belterra (262.726), Santarém (259.513) e Nova Esperança do Piriá (164.714). É importante ressaltar que, segundo as análises de imagens de satélite utilizadas, Paragominas, por exemplo, possuiria mais de três vezes área plantada de soja do que reportado pela Agência de Defesa Agropecuária (AGÊNCIA PARÁ, 2024).

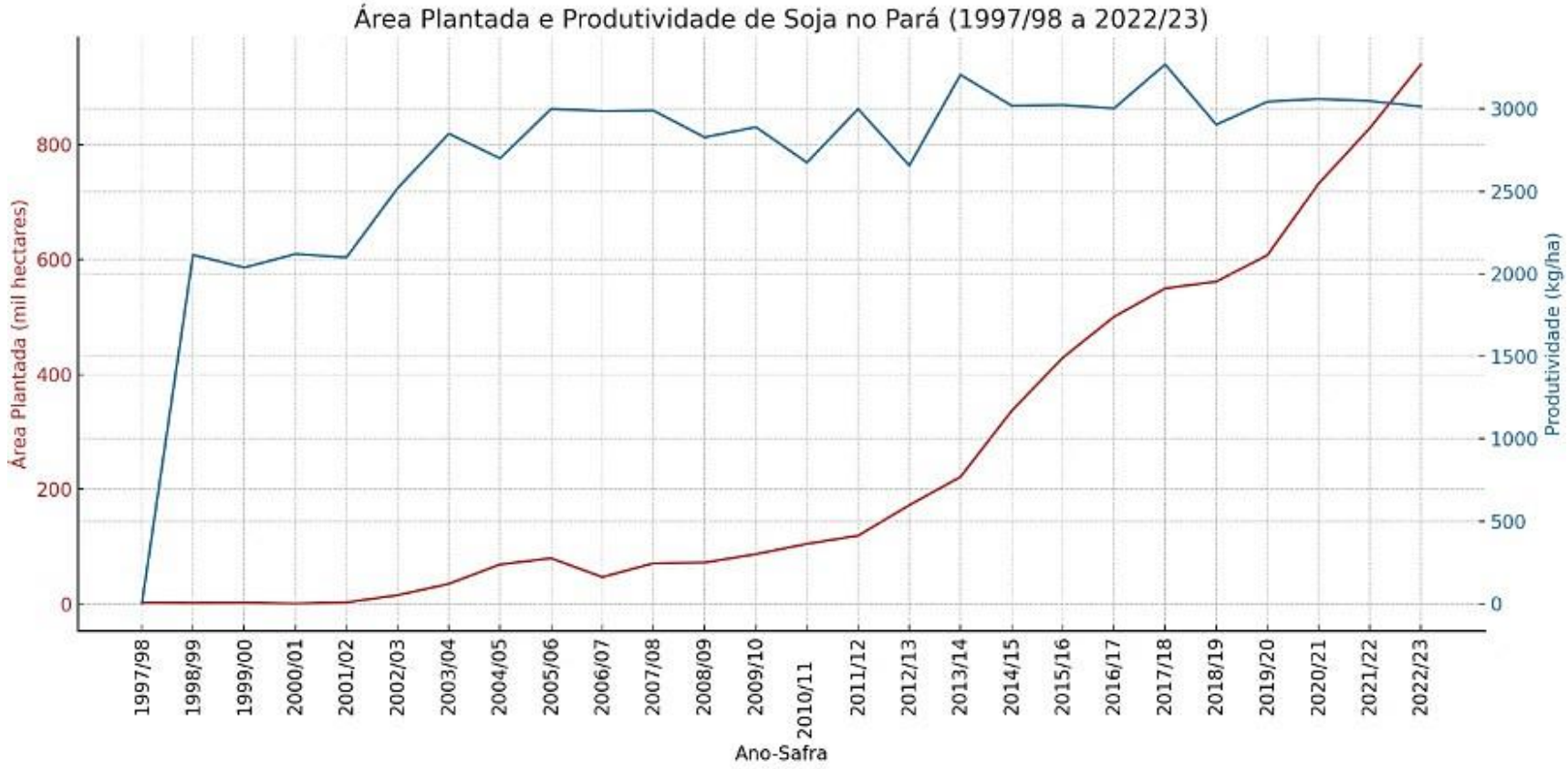
3.2 Momentos de Intensificação vs. área plantada

Em razão, tanto de suas implicações para o crescimento e desenvolvimento econômico, como para o bem-estar da população, a produtividade agrícola é um tema relevante dentro da economia (SILVA; FERREIRA FILHO, 2016), em especial de um país de base agrária como o Brasil. Segurança alimentar e desmatamento têm se colocado como questões, pode-se assim dizer, quase antagônicas; até que, com a Revolução Verde, a tecnologia pôde proporcionar o aumento da produtividade agrícola, evitando um avanço progressivo sobre novas áreas agriculturáveis como ocorrera até o século XIX. De acordo com Norman Borlaug (2002), se a produtividade da cultura de grãos em 1950 tivesse permanecido no mesmo nível em 2000, seriam necessários cerca de 1,2 bilhão de hectares para assegurar o mesmo nível produtivo no período, contra os 660 milhões de hectares à época utilizados. Atualmente (2017) mais 1,8 bilhão de hectares de terra são cultivados, ao redor do mundo (OLIPHANT; THENKABAIL; TELUGUNTLA, 2022).

A intensificação biotecnológica representada pela introdução das sementes transgênicas de soja, assim como outras estimativas (gastos com fertilizantes, agrotóxicos, sementes, royalties, juros, renda de fatores etc.), normalmente fornecidas pela Conab para grandes cidades produtoras, não foram reportados para os estados de Rondônia e para o Pará no relatório atual (CONAB, 2023). Nesta seção, concentraremos a análise sobre a produtividade obtida através da intensificação biotecnológica da soja (IBtS) no estado do Pará. Na seção seguinte, o parâmetro de referência ficará a cargo dos dados disponibilizados pela Conab para a cidade produtora de Sorriso-MT, em razão de suas semelhanças; proximidade, localizada na

bacia amazônica, tipo de solo e pluviosidade semelhantes, mesma rota de escoamento de produção e de desmatamento provocado pela soja em território amazônico, até 2013 (ASKEW et al., 1970; BOY et al., 2018; FERNANDES; HACON; NOVAIS, 2020; GAMA et al., 2020; MARCUZZO et al., 2011; MIRANDA; SILVA, 2024). No gráfico 2 é possível observar uma tendencia progressiva de crescimento de área plantada, e uma estabilização média de produtividade, ambas a partir de 2012.

Gráfico 2- Área plantada (mil hectares) e produtividade (kg/ha) da soja no estado do Pará entre as safras de 97/98 e 2022/2023.



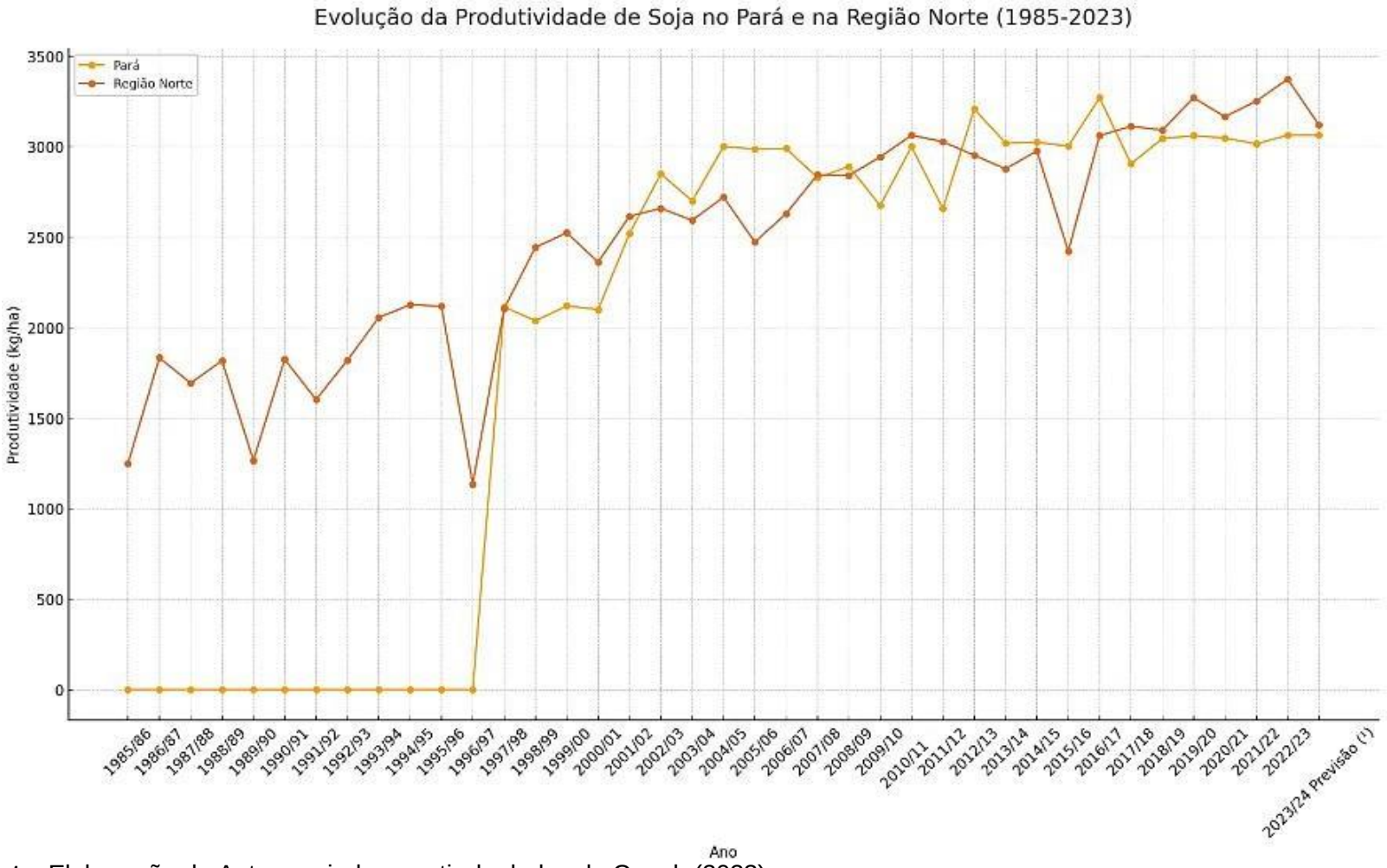
Fonte: Elaboração da Autora, criado a partir de dados da Conab (2023)

A estimativa de área plantada e produtividade de fato declaradas pelos produtores, assim como o tipo de tecnologia na semente, são dados necessários para uma acurada avaliação do crescimento da produtividade e da eficiência da transgenia na monocultura do da soja no estado Pará. Embora estejam atualmente indisponíveis na base de dados da ADEPARÁ, (em razão da atualização do sistema SIGEAGRO, segundo resposta de técnicos consultados pela autora) (ADEPARA, 2023), a correlação do aumento de produtividade da monocultura com os eventos de liberação comercial de novas tecnologias transgênicas já fora anteriormente utilizada como argumento de intensificação tecnológica da monocultura. Num premiado trabalho, Costa e Rocha (2022) puderam verificar, através do aumento de produtividade correlacionado com períodos específicos, a questão do avanço do desmatamento em razão da área plantada com processamento da de dados em imagem (aos quais também não constam em plataformas de livre acesso) e a HB para diferentes biomas brasileiros.

Da mesma forma, dados da Conab (2023) sobre área plantada e produtividade (Gráfico) são uma base disponível para a análise da intensificação transgênica. Os períodos históricos de intensificação biotecnológica foram definidos enquanto períodos em que a evolução biotecnológica disponibilizada no mercado poderia influenciar a produtividade da cultura no estado.

De acordo com Assunção et al. (2015), a intensificação tecnológica representada pelo melhoramento genético de sementes de soja, associada com a mecanização e os fertilizantes, garantiram um aumento considerável de produtividade por hectare, evitando um avanço da Fronteira agrícola de forma significativa, entre 1965 e 1985. Este modelo produtivo, em sua chegada à Amazônia, alcançou a marca dos 2000 kg por hectare em 1993. A marca fora superada somente na safra de 98 (>2500), para a região Norte. O Pará seguiu a tendencia, alcançando essa marca de produtividade em 2001, como pode ser observado no Gráfico 3.

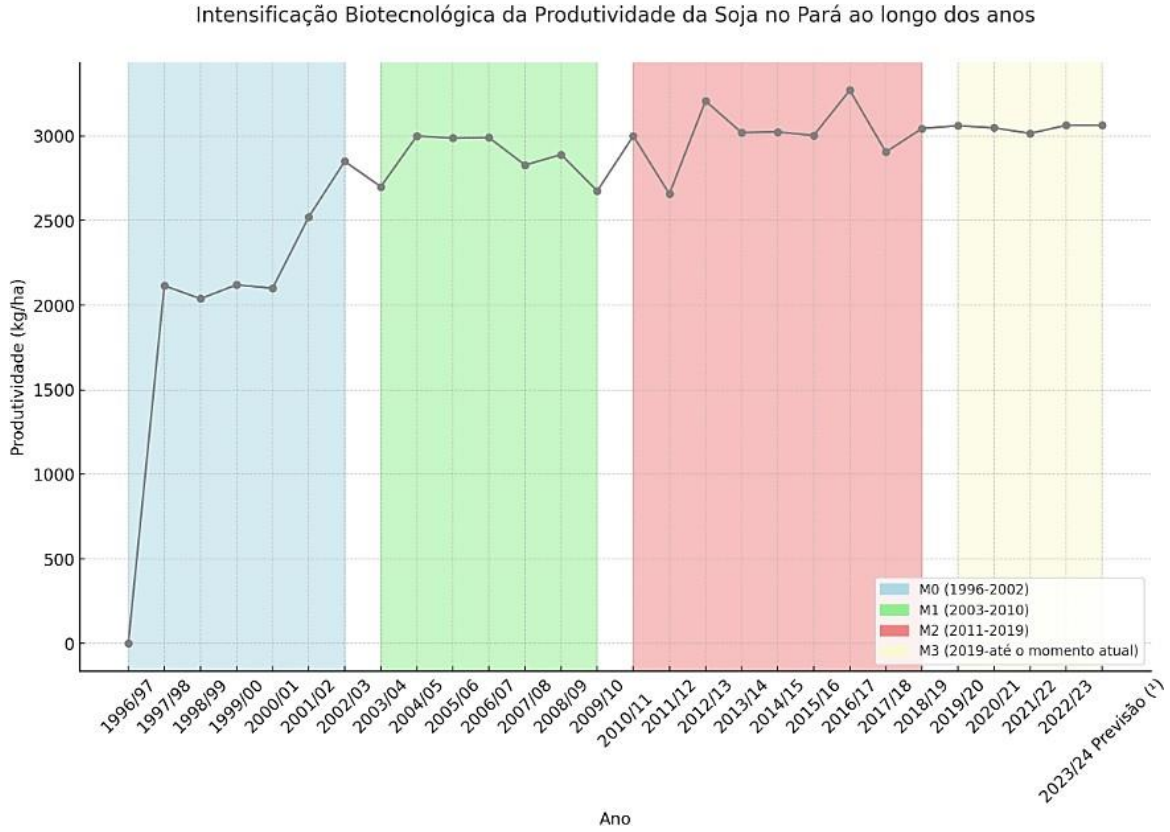
Gráfico 3- A evolução da produtividade da soja no Pará e na região norte (1985-2003).



Fonte: Elaboração da Autora, criado a partir de dados da Conab (2023)

Um potencial movimento de Intensificação Biotecnológica da Soja (IBtS) no Pará foi categorizado de acordo com quatro espaços de tempo correspondentes à liberação comercial dos eventos, iniciando-se no ano em que a tecnologia fora legalizada (Gráfico 4). Estes momentos representam o antes e o depois da chegada das novas tecnologias de soja transgênica no mercado brasileiro. Sendo estes; M0 (1996-2002) como “ausência de tecnologia transgênica no estado”; M1 (2003-2010) Liberação da Biotecnologia de resistência ao Herbicida glifosato, RoundUp Ready®; M2 (2011-2019) Liberação da tecnologia de resistência a insetos Bt, Intacta®; M3 (2019-até o momento atual) Terceira geração de soja transgênica, Soja Combinada I.

Gráfico 4- Intensificação biotecnológica e produtividade (kg/ha) da soja no Pará ao longo dos anos (1997-2023).



Fonte: Elaboração da Autora, criado a partir de dados da Conab (2023)

A significância estatística entre os momentos de intensificação biotecnológica e a média de produtividade da soja pode ser acompanhada na tabela. A variação de produtividade em mais de uma tonelada identificada entre alguns dos momentos é compatível valores que Costa e Rocha utilizaram para identificar a IBtS (COSTA; ROCHA, 2022). A partir da tabela, pode-se avaliar que o aumento da produtividade entre M1 e M0 tem baixa probabilidade estatística de ter ocorrido ao acaso, assim como para a M3 e M1. A análise de covariância (ANCOVA) identificou as correlações M0 vs M1, M1 vs M2 e M1 vs M3 com 12, 14 e 10 graus de liberdade, respectivamente. Desta forma, podemos identificar uma possível tendencia de IBtS no Pará, com presença de SC1 (M3, 2019 – atualidade).

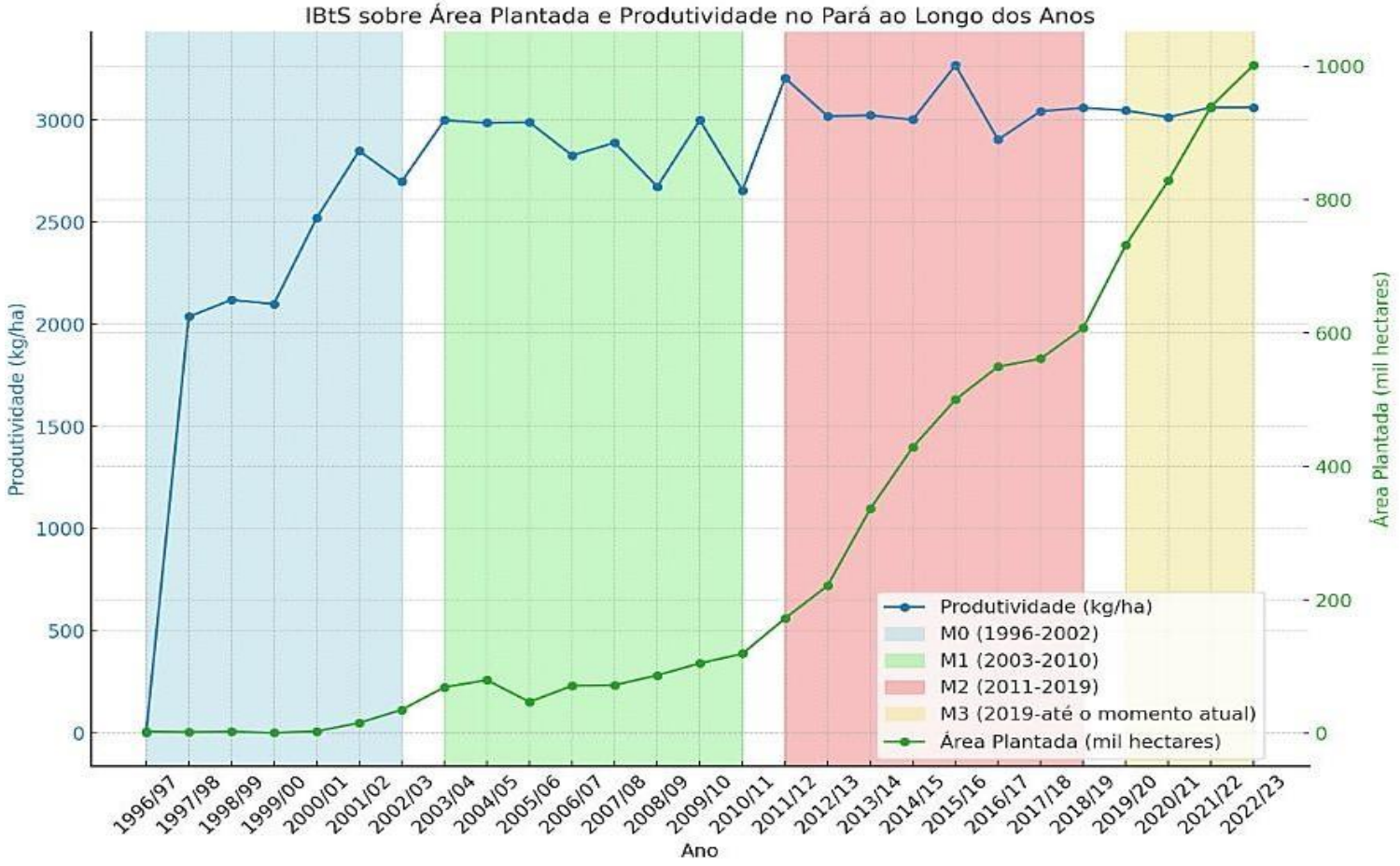
Tabela 2 – Tabela de Testes T Student e Análise de covariância para as médias de produtividade entre os momentos

Teste	Estatística t	Valor p	Valor F
t-test (1996-2002 vs 2003-2010)	-2.584571187099832	0.023896	-
ANCOVA (1996-2002 vs 2003-2010)	-	0.023896	6.680008
t-test (2003-2010 vs 2011-2019)	-1.8291593996316242	0.088752	-
ANCOVA (2003-2010 vs 2011-2019)	-	0.088752	3.345824
t-test (2003-2010 vs 2019-onwards)	-2.9031670541886836	0.015748	-
ANCOVA (2003-2010 vs 2019-onwards)	-	0.015748	8.428379

Fonte: Elaboração da Autora, criado a partir de dados da Conab (2023)

É possível que intervalos de IBtS que aumentaram significativamente a produtividade da soja no estado do Pará tenham uma correlação negativa com aumento médio (%) de área plantada no estado, no período seguinte. Isto pois, de acordo com a HB, um aumento de produtividade tende a desestimular o avanço sobre novas áreas agricultúraveis. Se a Hipótese de Borlaug é verdadeira, espera-se que o produtor rural do estado do Pará, ao adotar uma biotecnologia nova (Momentos M1, M2 e M3), perceba o aumento de produtividade naquela safra e, e em razão disto escolha até mesmo poupar o investimento em se abrir novas áreas para o plantio de soja no ano-safra seguinte; neste caso, um *plateu*, ou *suavização* na tendencia de crescimento poderia ser observado conseguinte à liberação de uma nova tecnologia. O gráfico 5 mostra tendencias diferentes do esperado entre os momentos de IBtS e o crescimento em área plantada (AP), ao longo das safras categorizadas (1997-2023).

Gráfico 5- Momentos de intensificação biotecnológica da soja e crescimento de área plantada e produtividade no Pará ao longo das safras (1997-2023).



Fonte: Elaboração da Autora, criado a partir de dados da Conab (2023)

Em apenas três anos (safra de 2017/18 até 2022/23), a área plantada praticamente dobrou, com produtividade constante e praticamente a mesma de 2012/13. Em uma década o aumento médio de produtividade esteve mais relacionado à redução das quedas, do que ao crescimento em si, com um aumento de quase cinco vezes em hectares de soja platados no estado.

A partir de uma análise visual, é possível identificar uma influência dos momentos de intensificação biotecnológica sobre o crescimento em área planta de soja, no período seguinte. A tendencia não aponta para uma suavização. Em vez disso, o lançamento de uma nova tecnologia aparece predecessor a um avanço da cultura sobre novas áreas. De fato, a linha de área plantada aparece com uma tendência acentuada de crescimento em relação à safra anterior a cada ano de liberação de uma nova biotecnologia da soja. A série começa na safra de 97, onde não existem registros de cultura transgênica da soja fora do Rio Grande do sul. Após o lançamento da tecnologia de resistência ao Glifosato (2003) A produtividade média no estado alcança pela primeira vez as 50 sacas e tem-se a primeira subida significativa de crescimento em AP. Após a liberação da primeira geração de soja Bt (2011), uma nova subida bode ser identificada (safra 2011/2012). E por fim, na safra de 2019/2020, a influência do lançamento da Soja Combinada I.

Inúmeras variáveis podem influenciar as escolhas em um empreendimento rural, de se aumentar ou estabilizar a área plantada do estabelecimento, ou de transacionar para a cultura da soja, e da modalidade transgência. Avaliar a capacidade do aumento de produtividade promovido pela IBtS em influenciar negativamente a tendencia de crescimento em área planta apresentada pelo setor no estado, ou seja, promover *land-sparing*, é um processo multivariável tão complexo quanto a própria inferição em si. Além de Costa e Rocha (2022), Costa (2023) apresentou um modelo para verificação de HB ou do caso do Paradoxo de Jevons (PJ) em contexto amazônico. O Índice de Jevons-Borlaug emprega interpretação entre a intensificação produtiva e a demanda de terras, direta e indireta. Um indicador sensível à demanda por terra e fortemente atrelado a variáveis de mercado.

Até aqui, apenas as tendencias nas correlações percentuais entre as médias de área plantada dos períodos são analisadas, sem considerar influências externas de mercado. Desta forma, para o caso de HB positiva, espera-se uma Correlação (p) negativa ou estabilização, entre a produtividade de um momento, e o crescimento em

área plantada o momento seguinte de intensificação, o que indicaria uma tendência de *land-sparing*. Para verificar se o aumento médio de produtividade influenciou a média de AP no momento seguinte (M0, M1, M2 e M3), a correlação entre a média das diferenças percentuais da produtividade de um período e a média das diferenças percentuais de AP no período seguinte fora analisada. O caminho oposto, isto é, a correlação entre as médias percentuais de AP no período e de produtividade no período seguinte também fora analisada.

A tabela 3 mostra diferenças nas médias percentuais entre um período de IBtS e outro para produtividade e a área plantada, apresentando a diferença percentual relacionada ao momento seguinte. Baseado nestas médias, a correlação de Pearson entre o aumento de produtividade e o crescimento da área plantada no ano seguinte para os momentos identificados foi positiva (0.109), porém frágil e estatisticamente insignificante (0.930). A correlação entre o aumento de AP e a produtividade no momento seguinte foi positiva (0.98) e estatisticamente significante (p= 0.01950).

Tabela 3 – Médias percentuais entre um período de IBtS e outro para produtividade e a área plantada.

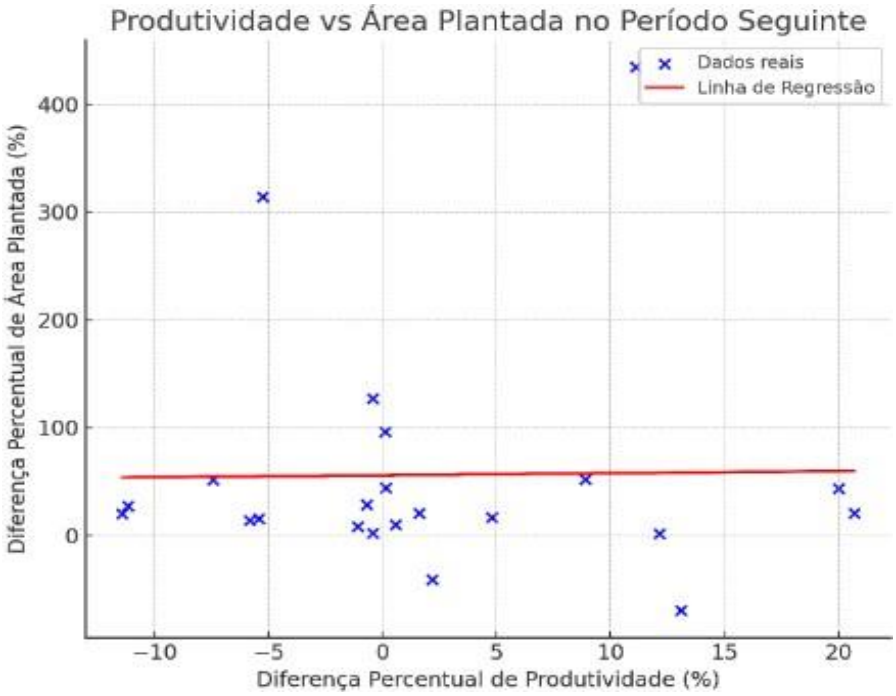
Período	Produtividade % Diferença	Área Plantada % Diferença	Área Plantada % Diferença no Próximo Período	Produtividade % Diferença no Próximo Período
M0 (1996–2002)	9.28%	135.26%	22.25%	9.28%
M1 (2003–2010)	0.10%	22.25%	23.66%	0.10%
M2 (2011–2019)	2.17%	23.66%	16.85%	2.17%
M3 (2019–até o momento atual)	0.02%	16.85%	N/A	N/A

Fonte: Elaboração da Autora, criado a partir de dados da Conab (2023)

Estatisticamente, aparentemente em razão de momentos de IBtS não foram identificadas correlações negativas sobre o crescimento da AP no estado do Pará para o período analisado. O coeficiente de Pearson relevou variáveis não-inversamente relacionadas, apesar da fragilidade estatística. Já o ganho de produtividade correlacionado ao aumento da área plantada no período anterior, apresentou-se estatisticamente significante. Pela lógica da HB, intervalos de IBtS que aumentem significativamente a produtividade da soja no estado do Pará (M1 sobre M0, M3 sobre

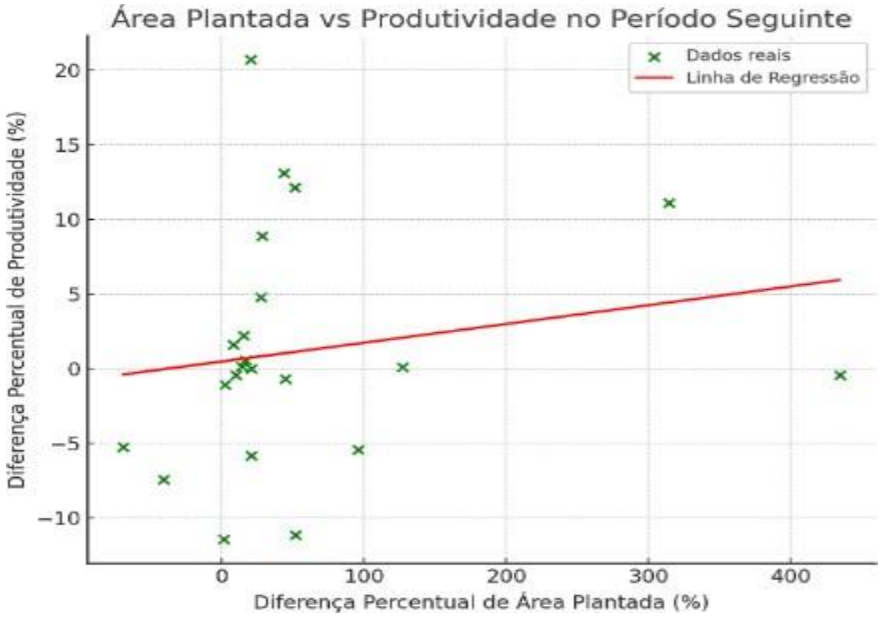
M1) teriam relação de significância negativa com aumento de área plantada no estado. Correlações de significância estatística negativa não foram identificadas neste estudo sobre estas variáveis. Portanto, os dados foram organizados dentro de um modelo de regressão linear (gráfico), para os dois formatos (Produtividade vs. AP seguinte, AP vs. produtividade seguinte). A regressão linear também buscou verificar se o aumento de produtividade dentro de um momento, influenciou negativamente a área plantada no momento seguinte, e em uma safra seguinte. A correlação de um ganho produtividade por IBtS no crescimento da área plantada no período seguinte, ou, no caminho oposto, um ganho de produtividade correlacionado de alguma forma ao AP, foram analisados através de Regressão Linear. Os Gráficos 6 e 7 mostram as regressões lineares para as duas situações. O caminho oposto da hipótese (AP vs. Produtividade seguinte) apresentou uma leve inclinação na linha de regressão (R= 0.19). Podemos considerar ambas as correlações positivas, porém, sem grande robustez (R^2 = 0.031 e 0.0002).

Gráfico 6- Regressão Linear da correlação entre as médias percentuais de produtividade versus área plantada no momento de IBtS seguinte.



Fonte: Elaboração da Autora, criado a partir de dados da Conab (2023)

Gráfico 7- Regressão Linear da correlação entre as médias percentuais de área plantada versus produtividade no momento de IBtS seguinte.



Fonte: Elaboração da Autora, criado a partir de dados da Conab (2023)

Costa & Rocha (2022) identificaram um padrão de efeito da agrobiotecnologia transgênica da soja em cima do bioma Amazônico. Onde, para cada 1 tonelada de aumento na produtividade, provocara uma redução em 5,7% de área na *Floresta Amazônica.* Este efeito explica uma tendência positiva do aumento de produtividade em relação ao aumento da área plantada no período seguinte. O aumento de área plantada não necessariamente significa o avanço sobre novas áreas, anteriormente florestais ou não. No entanto, um aumento de área plantada significa que a cultura avança sobre novas áreas, que poderiam estar sendo destinadas à conservação, num efeito de "*land-sparing*". A hipótese de Borlaug infere que "ao produzir mais alimentos por unidade de área cultivada, mais terras estariam disponíveis para outros usos, incluindo recreação e vida selvagem" (BORLAUG, 1972). Quando a produtividade aumenta em um momento seguinte ao aumento de AP, diversas variáveis de mercado, além da própria eficiência tecnológica, podem ser adicionadas à explicação.

Produtividade e área plantada são grandezas inversamente proporcionais. Isso significa que quando o nível de área plantada aumentar, a produtividade, enquanto a produção for constante, tende a cair. Logo, a produtividade aumenta por dois fatores: 1) aumento total da produção e 2) redução da área plantada, ou constância em razão do aumento de produção (HB). Como empreendimentos rurais não normalmente "reduzem" o tamanho de lote de suas atividades agropecuárias, a primeira opção é a realística.

Nesse caso, para verificar se de fato o aumento médio da AP influenciou no aumento médio da produtividade, haveria uma pergunta a se responder: como o aumento da AP influenciaria positivamente a produtividade?

Em muitos casos, a produtividade por hectare pode se manter constante ou até diminuir à medida que a área plantada aumenta, devido ao acesso a recursos ou diminuição da eficiência em áreas maiores. Para que a produtividade aumente, a produção por unidade adicional de terra deve ser maior do que a produção média anterior; isso significa que as novas áreas plantadas devem ser, no mínimo, tão produtivas quanto as áreas anteriores, ou mais produtivas.

Quando uma nova área é aberta para que se torne agriculturável é necessária uma injeção de capital inicial, inerente ao paradigma, que compreende a mecanização e os gastos com insumos. Este investimento é feito para se obter o melhor acesso possível ao solo (homogeneização do terreno e limpeza de arbustos), e aos seus

recursos (calagem para redução da acidez dos solos paraenses), para produção agrícola. A tendência de novas terras agriculturáveis recém anexadas a apresentar maiores produtividades não é exatamente uma novidade econômica. A alta de produtividade em um momento de IBtS seguinte é um resultado esperável pela própria intensificação. Dentro deste Capítulo não foi possível analisar ou quantificar a capacidade de uma área recém-formada no Pará, em fornecer maiores produtividade em razão de seus estoques naturais, com ou sem IBtS. Isto, em razão da indisponibilidade de dados ou estimativas para a comparação de produtividades entre os dois tipos, convencional e transgênica, para o Estado. Esta seção limitou-se à análise descritiva de correlações e tendências.

Por outro lado, a tendência de uma correlação positiva do avanço sobre novas terras na produtividade é esperada e explicável. Tanto por um caminho inverso à teoria da Renda Diferencial da Terra (LAPIDUS; OSTROVITIANOV, 1944), quanto pela Economia do Esgotamento de Liebig (1876). O investimento de capital aplicado em um solo sendo explorado há menos tempo originará uma produção maior. Da mesma forma os rendimentos na agricultura tendem a ser decrescentes por uma questão do esgotamento dos recursos do solo, o que leva agricultores a avançar sobre novas áreas (LIEBIG, 1878b).

A hipótese de Borlaug, ao inferir que um aumento de produtividade constante desencoraja o avanço sobre novas áreas, anteriormente cultivadas ou não, parece contar com uma lógica pré-existente, possivelmente oriunda de fora da mesma reprodução social que inspira a trajetória a perseguir rendimentos crescentes, através das novas tecnologias. Quando a hipótese, dentro do contexto da monocultura transferência de soja, infere que o aumento de produtividade deve desestimular o crescimento em área plantada, indubitavelmente conta com *uma noção de sustentabilidade pré-existente* dentro do senso comum dos produtores e empreendedores rurais. Do contrário, a homogeneização do *turnover* garantida pela IBtS pode se configurar como uma segurança ao produtor, para ser aumentar o investimento em AP, na safra seguinte. Esta tendência encontra congruência em movimentos como o “*free-market environment*”, do economista Julian Simon (1932-1998), que defendia ideias como o desenvolvimento econômico ilimitado e a inexistência de problemas de escassez.

Por outro lado, o Paradoxo de Jevons, quando aplicado à agricultura, prevê uma tendência de crescimento da demanda por terra em razão da intensificação (bio)tecnológica, paradoxalmente, em detrimento do *land-sparing* previsto na HB. O paradoxo também fora testado por Costa e Rocha (2022) para a Amazônia, com tendências positivas encontradas; houve aumento de desmatamento relacionado ao aumento de produtividade – também relacionada à utilização de cultivares transgênicas. Assunção et al. (2015) também relacionaram o aumento de produtividade à presença de melhoramento genético nas culturas, possibilitando a adaptação da Soja ao Cerrado. Afirmar ou negar a existência do Paradoxo de Jevons, especificamente para o estado do Pará, não é a intenção final deste capítulo. Tanto pela indisponibilidade de dados e, pelas particularidades intrínsecas às escolhas dos empreendedores rurais, quanto pela natureza de mercado inerente a indicadores como o IJB, que este capítulo se encaminha ao debate interdisciplinar sobre a *materialidade* dos reflexos da IBtS sobre este “ativo”.

Identificado por Jevons (1866), o fenômeno configurava um paradoxo da inovação tecnológica sobre o uso do carvão. A novidade tecnológica que aumentou a eficiência no uso do combustível estimulou, direta e indiretamente, novas atividades que, por esta razão, passaram a consumir mais matéria prima; desta forma, a inovação paradoxalmente resultou num aumento no consumo do recurso (JEVONS, 1866). O paradoxo de Jevons, abordado dentro de um contexto de monocultura da soja, costuma a vir correlacionado ao mercado de terras e ao avanço sobre florestas nativas ou outras áreas agropecuárias. Aplicando a lógica do paradoxo do carvão ao caso da terra, tem-se que, com a intensificação biotecnológica da soja, há um aumento da produtividade (eficiência no uso do recurso) e, portanto, um aumento no lucro. A partir daí, com o aumento dos lucros, um novo capital será atraído, o preço de vendas (da soja) cairá, mas a demanda (por terra) aumentará; e eventualmente, o maior número [de empreendimentos rurais] mais do que compensará a diminuição do consumo de cada uma” (Jevons, 1866, pp 124-125).

No Paradoxo de Jevons aplicado ao caso a terra e da monocultura transgênica da soja, infere-se que a lucratividade fruto do aumento de produtividade atrai mais empreendedores para a trajetória. O preço da soja cairia, em função da oferta, e o mercado de terras aqueceria, em função da demanda. O aquecimento no mercado de terras representa, neste sentido, o oposto do proposto pela Hipótese de Borlaug. O

aumento da competitividade que a maior produtividade ocasiona tem reflexos no mercado de terras (Índice de Jevons-Borlaug), e na conversão de paisagens.

Se, para evitar que se avance sobre novas áreas um aumento da produtividade por unidade de área faz-se necessário (HB) e, o aumento da lucratividade em função da eficiência no uso do recurso (maior produtividade ofertada pela IBtS) pode aumentar a demanda por terra ao atrair novos empreendimentos (PJ), temos que; tanto o aumento, quanto a diminuição da produtividade e da lucratividade, podem desencadear um avanço da monocultura na direção de novas áreas agricultáveis no estado. Isto pois, no curso de uma terra em exploração agrícola, a diminuição da produtividade e da lucratividade sempre representarão um risco às florestas nativas, especialmente em um cenário de aumento de *inputs*. Quando não for possível obter lucro em determinada unidade de terra, a tendência é avançar sobre uma outra, área ainda não explorada.

3.3 No limite da lucratividade; o ativo terra e a intensificação da reposição

Uma vez que, tanto o aumento quanto a diminuição da produtividade em uma determinada área podem levar ao avanço sobre novas terras, quais as condições levariam a uma situação de hipótese de Borlaug? Haveria uma situação hipotética em que um aumento na produtividade desencorajaria o avanço sobre novas áreas agricultáveis no Pará, a ponto de ignorar situações de mercado que possam vir a impelir a trajetória da monocultura, ao sentido contrário?

Como visto na sessão anterior, a partir das estimativas e dados disponíveis não foi possível confirmar a HB no estado. As tendências apontam para uma situação de paradoxo, sem que seja possível determiná-lo com precisão. Até aqui, a análise descritiva foi suficiente para apontar na direção de um PJ na trajetória no Estado do Pará, ainda que na ausência de indicadores de mercado. A seguir, continua-se a considerar os dois cenários possíveis, focando o escopo no cenário apontado pela análise anterior.

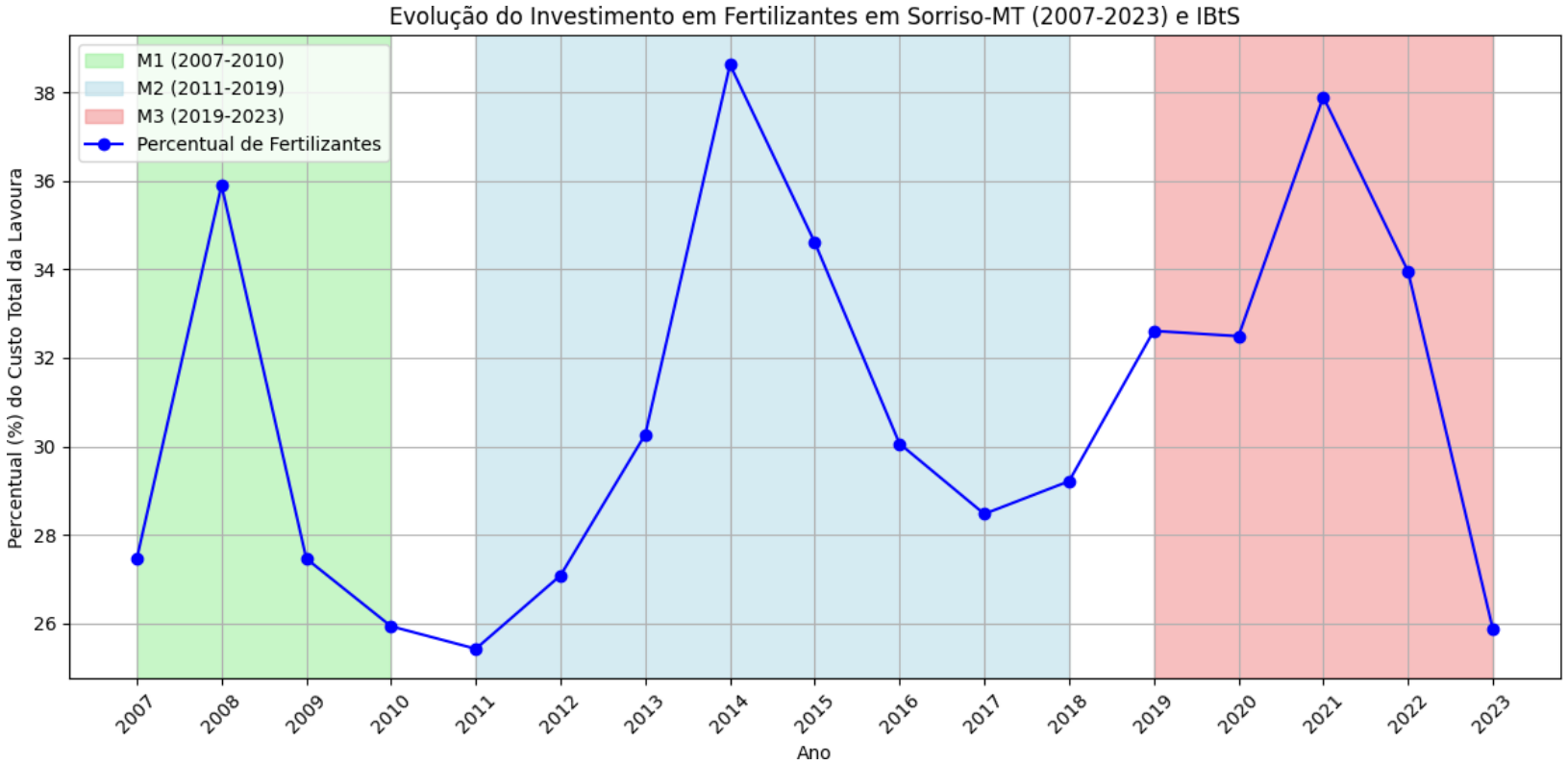
Jevons, na “questão do carvão” (*The Coal Question*), considerara que um aumento da eficiência do uso do recurso estaria sempre relacionado ao aumento da lucratividade da atividade.

O carvão, no entanto, é uma fonte de energia não renovável. A terra, por outro lado, é o meio de produção sobre o qual se baseia toda a economia do agronegócio. Desta forma, não é homeomorfa a comparação antológica desta commodity a uma tipologia referenciada no desígnio da consumpção até as cinzas, pois, é a possibilidade de replantio que garante a sustentabilidade econômica na atividade agrícola. Desta forma, a diferença entre a eficiência na queima do carvão e o uso da terra é ontológica; a não ser que se considere a capacidade de certos minerais, de armazenar formas de energia necessárias ao processo agrícola, e *exauríveis*.

Nestes termos, uma reconceitualização posiciona o ativo terra enquanto uma também fonte de energia, que pode ser extraída através da agricultura. A partir desta concepção, pode-se considerar que as fontes de energia mineral exauríveis são um ativo imobilizado ao qual, uma eficiência na exploração tende a, mais aceleradamente, conseguir alcançar. Desta forma, uma melhora na eficiência com a qual se explora (a energia) do recurso (solo) não necessariamente representa um aumento direto na lucratividade da atividade. Isto pois, da lucratividade se deduziria, ainda que não imediatamente, um custo de reposição maior, e em *consequência* do aumento de eficiência da biotecnologia. Por exemplo; o fósforo, importante nutriente da cultura da soja, que no limiar crítico recebia recomendações de reposição em 38,5kg/ha em 2004, passou para uma recomendação de 63,6kg/ha em 2016, em Bagé-RS. Já a recomendação de Potássio (K), considerado altamente demandado pela cultura da soja (exportação chega a 20kg/t de grão) chegou a variar em 204%, para mais, no mesmo período (SIQUEIRA; SIQUEIRA, 2018; MARTIN; PIRES; VEY, 2022).

A intensificação biotecnológica da soja garantiu uma estabilização da monocultura em altos (>3000kg/ha) patamares de produtividade e isto, sem dúvida, gerou maior liquidez dos investimentos. Da mesma forma, os gastos com fertilizantes chegaram a quase 40% dos custos totais da lavoura, girando e torno desta marca em três ocasiões, em Sorriso-MT (Gráfico 8). O nível de investimento (% do Custo Total) em reposição de nutrientes para a cidade amazônica de Sorriso-MT pode ser observada no gráfico, do ano-safra de 2007 a 2023, subposta aos momentos de Intensificação Biotecnológica da Soja.

Gráfico 8- Momentos de intensificação biotecnológica da soja sobre a evolução da estimativa de gastos com fertilizantes na cidade de Sorriso-MT (2007-2023)



Fonte: Elaboração da Autora, criado a partir de dados da Conab (2023)

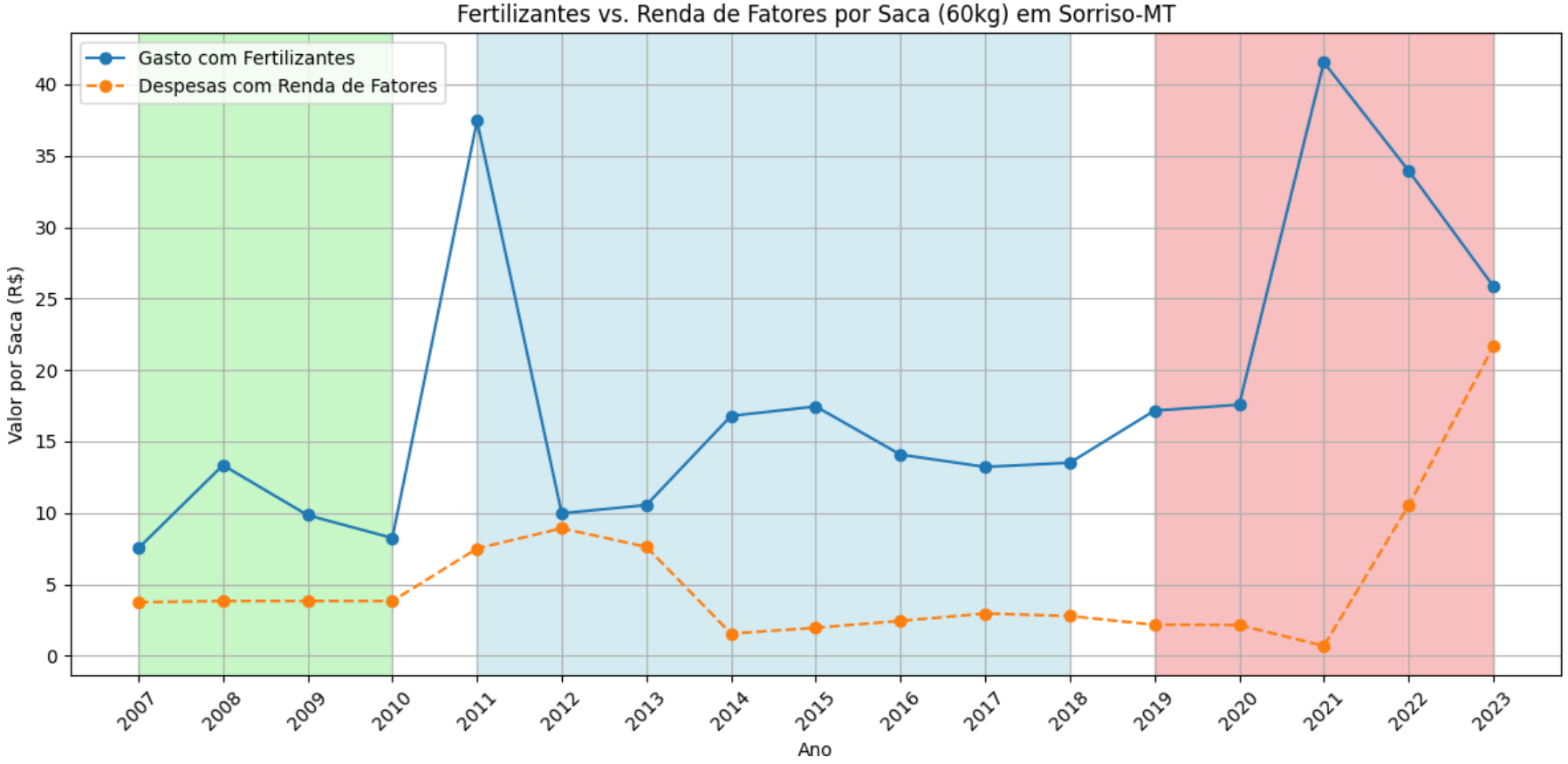
Dados a respeito dos gastos com fertilizantes ou estimativa de gastos estão indisponíveis no período, para o Estado do Pará. As três altas referenciadas em Sorriso-MT ocorreram não-necessariamente em razão de um aumento no uso de fertilizante; no primeiro pico a alta acontece ao lançamento de RoundUp Ready®, já no segundo momento, em 2014, com a Soja Bt liberada, o setor se recuperava da emergência sanitária com lagartas do gênero Helicoverpa (Decreto Presidencial n. 8.133, de 28 de outubro de 2013). Em 2021 o setor enfrentou o terceiro aumento do peso dos fertilizantes no custo de produção, em um cenário fruto da alta dependência de importação de insumos do setor (>60%)(PINAZZA, 2008). Sob influência da elevação do preço dos fertilizantes nitrogenados, em razão do conflito Rússia-Ucrânia (ALEXANDER et al., 2022; SCHNITKEY et al., 2022), não se pode afirmar que houve maior demanda ou uso de fertilizante, sendo a alta mais provavelmente relacionada à subida de preços.

Já uma alta nos preços da terra, relacionando-se com o aumento da demanda, é um indicador de mercado para uma possível situação de PJ. No caso do Pará, um hectare de terra girava em torno dos R$ 1000,00 em 2003, até que, em uma subida vertiginosa passou aos R$ 6000,00, no ano de 2009. Na mesma situação ocorreu no Mato Grosso no período, com uma variação entre R$ 3.900,00 e R$ 10.000,00 o hectare (CAETANO BACHA; STEGE; HARBS, 2016). Segundo a FGV, a tendencia de crescimento continua; na atualidade (2023), a média do hectare agriculturável apresenta-se em R$ 13.766,67 no Pará e, no Mato Grosso, R$ 36.875,00 (FABBRI; OLIVEIRA, 2024). Para o Pará, o aumento foi de 500% entre 2003 e 2009, contra 156,41% no MT. De 2009 para 2023, o hectare subiu 129,44% no Pará e, 268,75% no Mato Grosso.

Dentro da série histórica da soja na Conab existem parâmetros pecuniários que podem ser associados ao aquecimento direto do mercado de terras. Mesmo para cidades-polo produtivas do Pará, como Santarém e Paragominas, estas estimativas não estão disponíveis, como o estão para outras cidades do Norte, e.g. Porto Velho-RO e Porto Nacional-TO. No relatório de Sorriso-MT, que desde 2018 reporta somente soja OGM (CONAB 2023), até o ano de 2020 a categoria “Renda de Fatores” compreendia as seguintes subcategorias de despesas; I) Remuneração esperada sobre o capital fixo, II) Terra Própria e III) Arrendamento. A partir de 2020, o “Arrendamento” deixou de aparecer dentro da categoria, não somente para Sorriso,

como para todas as cidades do Mato Grosso. Aparentemente, a categoria Renda de Fatores tornou-se um termo atrelado a quaisquer tipos de gastos em cima do uso da terra, incluindo o Arrendamento. O termo “arrendamento” em si torna-se então subentendido, especialmente nesse contexto de subida de valores para aquisição de novos hectares. No caso de Sorriso-MT, o valor a associado à categoria cresceu vertiginosamente nos anos subsequentes a esta “recategorização” no relatório da CONAB (2023). Esta alta seria esperada, dado o aquecimento do mercado de terras no Estado. No Gráfico 9 encontra-se a comparação dos valores, por saca de soja, entre gastos com fertilizantes e com a Renda de Fatores, dentro dos momentos temporais de IBtS. Pode-se dizer que os gastos com a utilização de novas áreas agricultu̇ráveis tendem a crescer em momentos em que os gastos com a reposição de nutrientes despencam, e vice-versa. É possível observar esta tendência de forma mais consistente no ano seguinte à libração da soja Bt (2011).

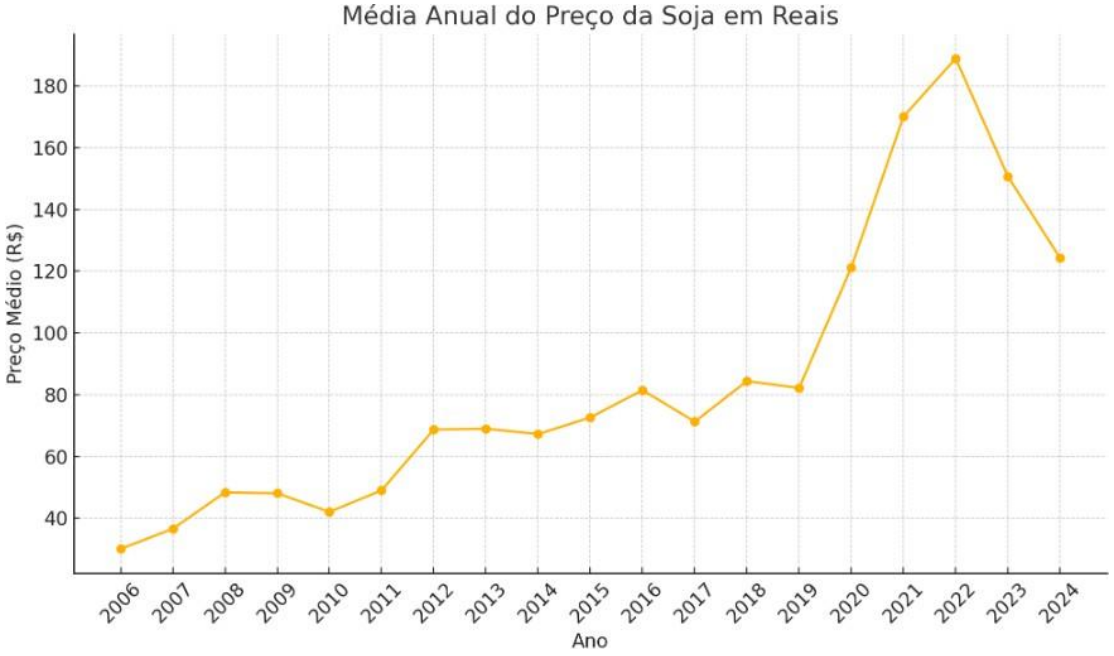
Gráfico 9- Momentos de IBtS sobre comparativo do custo por saca de soja (60 Kg) exigido pelo uso do solo e pela reposição de nutrientes



Fonte: Elaboração da Autora, criado a partir de dados da Conab (2023).

No momento mais recente de crescimento econômico da atividade sojicultora, o cenário da pandemia da covid-19 permitiu ao setor um aumento da lucratividade lastreado na valorização mundial da Commodity. Após seis safras de preços pouco atrativos (Gráfico 12), a conjuntura da pandemia, pode-se dizer, “salvou” o setor antes que o preço do fertilizante nitrogenado chegasse a triplicar (SCHNITKEY et al., 2022). Isto pois, a alta de preços provavelmente “inspirou” (quase tanto quanto a SCI, como visto no tópico anterior) o setor a aumentar a área plantada no estado em 2020, o Aumento de lucratividade em razão da área plantada, do preço da saca e da produtividade evitou que o conflito Rússia-Ucrânia atingisse um setor desprevenido. Este fator, no entanto, foi insuficiente para impedir que o impacto do conflito elevasse a necessidade de se recorrer ao crédito, traduzindo-se em juros acima dos R$ 300,00 por hectare, em Sorriso.

Gráfico 10 - Média anual do preço da soja em Reais.



Fonte: Elaboração da Autora, criado a partir de dados do CEPEA (2023)

No estado do Pará, apesar da alta no preço do grão em 2020, a lucratividade da monocultura da soja esteve relativamente ameaçada durante o período de conflito no hemisfério norte, considerando os mesmos custos totais para Sorriso-MT, incluindo os gastos com terra, muito provavelmente divergentes dos reais. O crescimento global da produção no Estado, em subida vertiginosa desde 2012 (Gráfico 11) garantiu uma

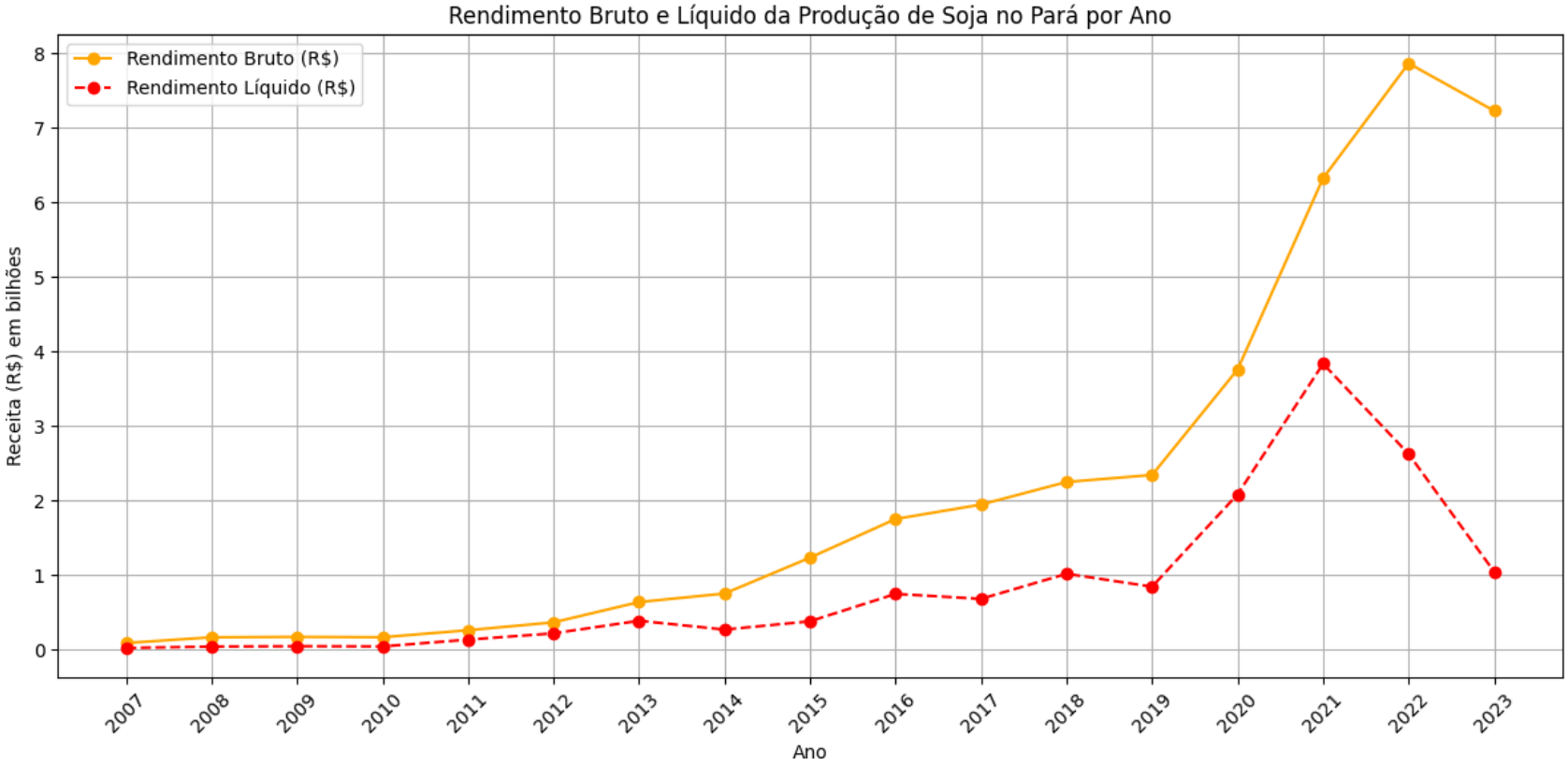
produção total superavitária, apesar do aumento nos custos de produção. No gráfico 12, a média anual do preço da saca da soja multiplicada pela produção no estado representa a lucratividade bruta da cultura, sendo a lucratividade líquida deduzida desta, com dados baseados nas estimativas anuais de Custos Totais por saca (60kg) para Sorriso-MT (CONAB, 2023). Apesar do crescimento em AP, produção e produtividade, a lucratividade da cultura declinou em direção a patamares iniciais pré-pandemia (2019), se considerada a média anual CEPEA, ainda que o preço da saca tenha se mantido acima dos R$ 120,00 – nesta situação, um custo por saca acima de R$20,00 pelo uso da terra (Renda de Fatores), tem um impacto muito maior. Estes dados demonstrariam uma situação tendencial de queda de lucratividade no setor, aparentemente em função da conjuntura externa de alta dos fertilizantes, caso o custo ou, mais especificamente o gasto com a terra no Pará, tenha acompanhado a tendência do MT. Estimativas para o estado estão indisponíveis.

Em seguida, reproduziu-se um cenário utilizado por Borlaug (2002), quando considerara a intensificação tecnológica e consequente aumento de produtividade da cultura de grãos em 1950-2000, como responsável por evitar a expansão de área agriculturável em 45% (660 milhões ao invés de 1,2 mi de ha). Criou-se então uma estimativa de crescimento menos acentuado e mais compatível com o esperado, pela tendência, a fim de simular possibilidades reais de redução de AP, apesar do cenário mundial. No Gráfico 15, a diferença percentual de crescimento de AP entre uma safra e outra foi calculada, sendo reduzida em 45% para cada ano. Os valores de lucratividade bruta e líquida da soja correspondentes ao estado do Pará estão ajustados ao cenário hipotético de redução de Área Plantada dentro deste gráfico (Gráfico 13), considerando a média de preços CEPEA apenas referente ao período de fevereiro e junho, período de colheita no Norte.

Gráfico 11- Evolução da produção de soja no estado do Pará em sacas (60 Kg)

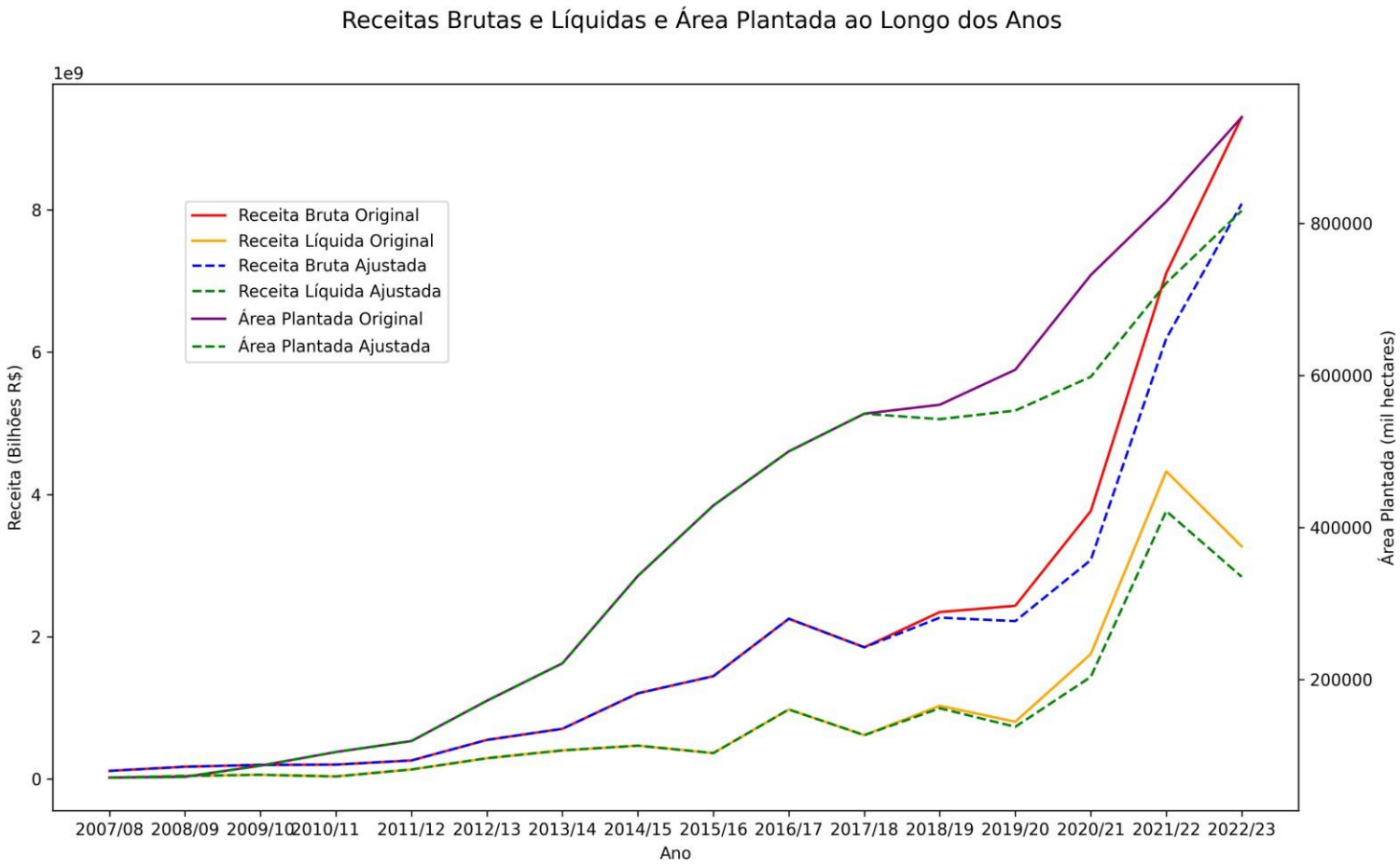
Fonte: Elaboração da Autora, criado a partir de dados da Conab (2023)

Gráfico 12- Receitas Brutas e líquidas da produção de soja no estado do Pará ao longo dos anos.



Fonte: Elaboração da Autora, criado a partir de dados da Conab (2023) e CEPEA (2023)

Gráfico 13- Área plantada e AP reajustada e lucratividade reajustada da produção de soja no estado do Pará ao longo dos anos.



Fonte: Elaboração da Autora, criado a partir de dados da Conab (2023) e CEPEA (2023).

A partir de uma análise visual, a linha de crescimento em área plantada da soja no estado do Pará recalculada, com a redução percentual (45%) esperada, apresenta um comportamento de crescimento normal, com relação às tendências dos anos anteriores.

Entre as safras 2016/17 e 2019/2020, as curvas de receitas seguiram basicamente o mesmo padrão. O crescimento de área plantada que, de forma generalizada representa tanto a entrada de novos empreendimentos, quanto o aquecimento do mercado de terras num período, não se refletiu na queda de preços da saca no período seguinte; o preço da saca continuou subindo, como a receita bruta pode demonstrar. Isto não é inesperado, a soja é uma commodity mundial, lastreada na exportação, e dificilmente o aumento em área plantada e a maior oferta de soja em mercados regionais imprimiram força sobre o preço da saca.

Já o aumento da lucratividade da atividade, em função do aumento do preço da saca (início de 2020), pode-se observar, atraiu mais investimentos (aumento em AP). E isto aumentou a demanda sobre novas terras, como pode-se inferir a partir do aumento dos preços da terra no Pará e no MT, como anteriormente reportado (CAETANO BACHA; STEGE; HARBS, 2016; FABBRI; OLIVEIRA, 2024) e no aumento dos gastos com a Renda de Fatores, no período.

Desta forma, a subida do preço da commodity em razão da conjuntura pandêmica e, a subida do preço da terra no MT, possivelmente acabou por acelerar o avanço de AP no estado do Pará no período estudado. Quando observada a curva “normal’ (-45%), apesar de não possível afirmar ou negar que tenha havido diminuição de avanço individual de cada empreendimento, em razão do aumento de competitividade (IBtS), o aumento global de AP muito provavelmente superou um possível “*land-sparing*” no período.

Nesta análise, onde a dependência do mercado externo submete as regras de competitividade da agricultura a uma conjuntura internacional, é importante ressaltar que, se os empreendimentos rurais do Pará tivessem optado por manter um crescimento normal (45% menor do que a taxa de crescimento observada) a queda de lucratividade seria ainda mais acentuada, como pode ser observado no Gráfico 13. Neste cenário hipotético, a queda de lucratividade poderia ser atenuada pelo preço mais baixo da terra no Estado.

Aparentemente, o aumento da lucratividade da IBtS em si fora insuficiente para evitar, tanto que a pressão por commodities na pandemia (2020/2021) puxasse o crescimento em área plantada sobremaneira, como que efeito semelhante, ocasionado pelo aumento dos gastos fertilizantes nitrogenados, ocorresse. O setor da soja paraense pode considerar que a IBtS ajudou a garantir os rendimentos que possivelmente evitaram a quebra do setor, ainda que isto não tivesse sido possível sem o avanço em AP, facilitado pelo preço da terra.

Nesta situação, uma oferta de terras maior que a demanda, configura-se, de alguma forma, como indicador oposto ao Paradoxo. No entanto, a escolha pela Intensificação, que exige maiores inputs ao longo do tempo, foi a mesma que atrelou os custos de produção ao cenário Internacional, permitindo que pressões de mercado, como o aumento do preço da comodity, possivelmente, instigassem o crescimento de área plantada, mesmo com altas produtividades.

Interessantemente, até então as forças de mercado explicam por si só a tendencia de crescimento em área plantada do setor. Por outro lado, o gráfico 8 havia demonstrado um momento de subida de gastos com arrendamento/uso de Terra e diminuição de gastos com fertilizantes, conseguintemente e possivelmente em razão subida dos preços (safra 2021/22). Os preços caíram, mas o investimento em Sorriso-MT parece ter seguido outro caminho. É possível que os empreendedores tenham passado a investir mais na exploração de novas terras, após o susto ocasionado pela alta dos preços relacionados à reposição de nutrientes. Segundo Delgado (2013, p. 64), a economia do agronegócio ou as agroestratégias (ainda) estão assentadas “[...] na captura e superexploração das vantagens comparativas naturais” ou na renda fundiária. Esta exploração de vantagens comparativas naturais não é igual, porque um solo pode ser mais ou menos fértil. Considerando solos equivalentes, uma terra menos fértil está em uso há mais tempo e desta já fora removida a riqueza em micronutrientes.

Este processo de empobrecimento levaria, naturalmente, a uma agricultura extensiva, em razão da exaustão do solo (*Raubwirtshaft*). No processo fundamental de produção de comida, é do ritmo e da diversidade (elementar) da exploração mineral do solo, em detrimento do investimento em reposição, que se extrai o *surplus*. Desta forma, pode-se esperar um *limite* à continuidade da atividade econômica sobre um determinado solo, e que a este limite respondam tanto o mercado, quanto o produtor.

Ainda, o Momento do tempo no qual a exploração de uma terra agrícola, nos moldes previstos pela grande agricultura capitalista, provoca um massivo deslocamento de recursos minerais do solo de um local para outro foi resgatado por Bellamy Foster em um termo anteriormente descrito e trata-se de; uma quebra na ciclagem natural dos nutrientes que deixam de ser decompostos e devolvidos ao solo do local de origem (que termina esgotado, Liebig). Segundo Bellamy Foster (FOSTER, 2024), cientistas têm se referido a questão como “Fenda Antropogênica” imposta aos ciclos biogeoquímicos de todo o planeta – Um abismo criado entre a origem e o retorno da matéria. Neste contexto, em tempos de economia globalizada, a previsibilidade de tal momento torna então, o paradoxo da disponibilização de mais terras mesmo com as produtividades da IBtS, menos paradoxal – ou mesmo em razão desta?

Ambas as alternativas vão de encontro à ideia de que, uma melhora na eficiência no uso da terra estimula o avanço da monocultura sobre novas áreas agriculturáveis paradoxalmente (PJ), em razão pura e simples das leis de mercado. Todavia, interessantemente o Momento previsto e comum aos solos em exploração, alocado dentro de uma lógica especulativa e de IBtS também é capaz de explicar que, ao aumento da competitividade resultante do aumento da produtividade, o mercado responda, não tão paradoxalmente, com a oferta de novas terras – e igualmente refuta-se o esperado *land-sparing* (HB).

O requerimento de nutrientes da soja varia de acordo com o solo, condições climáticas, o tipo de cultivar, o nível de produtividade etc. (IMAS, 2008). A dinâmica produtiva da e seus caminhos de inovação biotecnológica tendem a buscar uma maior produtividade baseado na eficiência da exploração do recurso. No entanto, a intensificação biotecnológica da exploração do recurso dá-se não somente pelo aumento de eficiência da absorção dos micronutrientes *devolvidos* (SHELKE et al., 2023a). Os fertilizantes repõem determinados elementos, enquanto outros são fornecidos pelos estoques do solo. De acordo com Huang (2017, p. 15), nesta segunda geração de sementes transgênicas (2011, tecnologia Bt), as pretendidas alterações foram alcançadas significativamente. Ainda de acordo com Huang (2017, p. 16), as plantas geneticamente modificadas da segunda geração são caracterizadas por *outputs* produtivos e.g. maior valor nutricional (aminoácidos, ácidos graxos, vitaminas, etc.), maior disponibilidade de nutrientes ou uma menor concentração de substâncias indesejáveis (por exemplo, fitato, lignina, substâncias alergênicas). Desta

forma, o investimento em sementes transgênicas de soja apresenta-se como a garantia ao produtor de maior produtividade, e em razão disto, maior lucratividade.

Esta lucratividade encontra-se fundamentalmente enraizada dentro da biotecnologia abarcada na semente, desenvolvida para o uso conjunto a agroquímicos e fertilizantes. Se, nas mais importantes regiões produtivas do Mato Grosso, tanto a tecnologia convencional quanto as com sementes da IBtS equiparam-se em gastos com reposição (OLIVEIRA NETO, 2016), e a semente OGM entrega mais produtividade em razão da tecnologia abarcada, podemos imaginar que a lucratividade da IBtS, *ad instar*, assenta-se na "captura e superexploração de vantagens comparativas naturais". Neste caso, assentam-se sobre as características edafoclimáticas que compreendem tanto o Norte do Mato Grosso quanto as regiões-polo produtivas desta monocultura no Pará, quais sejam, as anteriormente mencionadas; pluviosidade, radiação, temperatura e os tipos de solos ferrálicos, de onde a equação que balanceia a extração de nutrientes e a reposição mineral, resulta em um saldo positivo, com produtividades acima dos 3500kg/ha, como em Sorriso-MT (CONAB, 2023).

Amplamente difundindo, o processo de reposição de nutrientes é uma prerrogativa produtiva básica da agricultura de larga escala, tão imprescindível que chega a ter efeito de "lei". Isto pois, a resposta da produção é condicionada ao nutriente mais escasso no solo, chamado de elemento limitante (BROWNE, 1942). De fato, o efeito da redução dos estoques de potássio (K), fósforo (P) e a correlação do nitrogênio e da água com a produtividade agrícola vem sendo utilizado em modelos matemáticos que estimam o quanto de nutriente (mínimo, limite crítico) é necessário para se manter uma determinada produtividade, há quase dois séculos (PARIS; PARIS, 1985). A chamada Lei dos mínimos de Liebig (LLM), apesar de popular, vem sendo evitada frequentemente por pesquisadores, em razão da limitação mecanista (TANG; RILEY, 2021), e de formulações algébricas que impossibilitam produções decrescentes (KREUZ; LANZER; PARIS, 1995).

A queda da lucratividade de uma atividade rural onde, presume-se, outrora decrescente, transformou-se em um processo "evitável", com a Revolução Verde. Desta forma, há um senso comum na crença de que a constante injeção de capital pode manter uma constante produtividade, ou mesmo crescente na próxima "novidade tecnológica" – e evitar o avanço sobre novas áreas (HB).

Por outro lado, a anergia contida nos micronutrientes do ativo terra é um elemento limitante à produção. Até o momento em que a energia do ativo atinja níveis de liquidez onde a produtividade comece a declinar, mesmo *apesar do input* e do aumento dele e, também em razão do aumento deste declinar a lucratividade, pode-se esperar que a intensificação biotecnológica traga uma tendência em função do tempo, de empurrar a trajetória na direção de novas áreas agricultu̇ráveis. Este momento de transição seria um limiar adiável pelo tempo em que liquidar o ativo, através da intensificação biotecnológica, mantenha alta a produtividade.

Este momento encontra na própria lucratividade o seu limite de existência, quando a necessidade de reposição mineral e o valor do micronutriente que foi liquidado tornar a atividade economicamente insustentável. A partir disto, tanto a constante (por flutuações de preços) quanto a progressiva (com mais investimento em fertilizantes) injeção de capital deve ser questionada, quanto à capacidade de evitar os rendimentos decrescentes dentro deste modelo produtivo. Não existe possibilidade material onde a superexploração da vantagem comparativa natural que a monocultura encontra no Pará resulte em rendimentos crescentes, ou mesmo estáveis, eternos. A exploração do que *não se repõe* mantém uma lucratividade cuja queda pode, congruentemente, ser atrasada pela eficiência da IBtS em explorar o recurso. Atualmente, essa exploração encontra-se norteada por lógica de inovação que tende a perseguir maiores produtividades, frequentemente com o mesmo nível de investimento em fertilizantes e em teoria, redução de gastos com insumos (agrotóxicos)(BROOKES; BARFOOT, 2020). Neste sentindo, a capacidade da IBtS de resultar em *land-sparing* pode ser verdadeira pelo tempo em que a reposição do mínimo necessário para a produção seja economicamente viável, ou seja; enquanto a deterioração do ativo não inviabilizar sua exploração.

Modelagens baseadas na (mesma mecânica que a) LLM são utilizadas para predição de produtividades agrícolas e são relevantes do ponto de vista da segurança alimentar (TANG; RILEY, 2021). No próximo capítulo, a LLM será revisitada por considerar um limite produtivo material baseado no recurso dos solos. A vantagem natural comparativa mais abundante aos solos do Pará é um micronutriente imprescindível à cultura da soja cuja reposição tornaria a exploração do ativo inviável no estado. No capítulo a seguir, analisaremos a eficiência biotecnológica da IBtS na exploração de um micronutriente ainda pouco discutido na literatura.

4 O FERRO PARA ALÉM DO GUSA: FISIOLOGIA DA SOJA BT SOBRE OS SOLOS VERMELHOS DO PARÁ

O presente capítulo constitui-se em um resgate da mutação tecnológica da Soja no Brasil, os efeitos da edição genética sobre energia metabólica da planta e, presume uma correspondência entre a síntese das proteínas exógenas e o substrato utilizado. Ao final do capítulo, uma estimativa de correspondência entre a síntese de proteínas e toxinas que compõe o portfólio biotecnológico nas três gerações de transgenia da semente, e a composição mineral do solo é apresentada. As modelagens propostas neste capítulo apresentam a possibilidade de se incluir uma variável químico-genético-biomolecular para discutir a diminuição da lucratividade e a sustentabilidade da monocultura no estado, em razão da desmineralização gradual do ativo pela eficiência na exploração do recurso.

4.2 Evolução biotecnológica da soja “pronta para” resistir ao glifosato ao ataque de pragas

Registrado no ano de 2003, o evento GTS-40-3-2 (MON 89788) deu às sementes de soja uma poderosa característica capaz de favorecer a maximização de rendimentos com a homogeneização da cultura, através da expressão de uma proteína capaz de degradas o Glifosato RoundUp®. Em 2010, a Liberação Comercial de Soja Geneticamente Modificada resistente a insetos e tolerante a herbicida, Soja MON 87701 x MON 89788 (Processo nº 01200.001864/2009-00, Parecer Técnico nº 2542-2010 CTNBio) autorizara o uso de um cultivar não somente resistente ao glifosato (semelhante a GTS-40-3-2, mas com outro vetor de inserção), como também capaz de sintetizar de um inseticida natural, derivado da expressão gênica “Cry1a”. Logo, a incorporação de genes do bacilo entomopatogênico *Bacillus thuringiensis* (Bt) dentro do DNA deu às plântulas de soja a capacidade de eliminar populações inteiras de insetos danosos.

Sabe-se que, por causa da tendencia inerente aos insetos de desenvolver resistência às toxinas aos quais são continuamente expostos (ABDEL-BANAT; EL-SHAFIE, 2021; KOUL, 2022) e da seleção ativa resultante, as estratégias para a sustentabilidade do uso do Bt e seus produtos na agricultura envolvem uma pesquisa

também contínua, em busca da estabilização de novas cepas capazes de entregar taxas de letalidade satisfatórias. Esta tendencia, que continua sendo o principal problema enfrentado pela tecnologia Bt, é também um forte propulsor da inovação biotecnológica. O desempenho insatisfatório apresentado por patentes existentes em superar a resistência desenvolvida pelas espécies de insetos no campo (KAUR; DILAWARI, 2011; MA et al., 2017) e em populações criadas em laboratório é uma das razões que impulsiona a biotecnologia na busca de uma constante transformação.

Até 2017, mais de 600 genes inseticidas já haviam sido clonados a partir de diferentes cepas *Bt* (DAR; WANI; KANDOO, 2017). Com sucesso, um número considerável destes genes fora expresso dentro de plantas, de forma independente ou em combinação com outras moléculas tóxicas, de alta especificidade (DAR; WANI; KANDOO, 2017; LUCENA et al., 2014; SZEKACS; DARVAS, 2013). A pesquisa biotecnológica hoje entrega proteínas Cry mutantes, a exemplo da proteína Cry1AbMod; elimina populações de insetos resistentes as toxinas Cry convencionais, mas apresenta baixa a letalidade e perda de potência contra insetos ainda suscetíveis (DAR; WANI; KANDOO, 2017).

Após a liberação comercial da soja Bt no Brasil, alguns autores afirmam que somente a partir de 2012 a tecnologia ganhou força entre os produtores (LIMA, SILVA FILHO, 2018). Isto sugere que, até então, havia um momento de “esperar pra ver” a nova tecnologia. Hipoteticamente existiria algum nível de precaução na adoção desta novidade biotecnológica em específico (Soja Bt), nos empreendimentos rurais. Uma revisão bibliográfica sobre o assunto remonta a um momento de debate acirrado em torno do tema, onde a própria legitimidade da CTNBio para emissão de pareceres técnicos foi questionada (CAMPOS, 2019; CASTRO, 2011; RIBEIRO; SCHIOCCHET, 2013). À época, em detrimento do imprescindível debate interdisciplinar acadêmico, a discussão foi escalada dentro da sociedade civil ao nível da chamada “polarização” política (BISSOLI, 2022). De um lado “grupos favoráveis... os setores ligados ao agronegócio, bancada ruralista e parcela dos cientistas e corporações de biotecnologia, do outro, grupos contrários...” (BISSOLI, 2022), tradicionalmente ligados à ambientalistas e socialistas. Pareceres técnicos e Liberações Comerciais que reconstituem a história do desenvolvimento biotecnológico da soja BT, anteriormente disponíveis no site do CTNBio, podem ser consultados a partir do arquivo no site da FAO.

Entre 2010 (liberação do cruzamento MON 87701 x MON 89788) e 2017, a biotecnologia da soja se desenvolveu no sentido de adicionar tolerância a herbicidas diferentes e ao vírus mosaico do feijão. Já em 2018, o parecer técnico Nº 5832/2018 (CTNBio apud FAO, 2023) autoriza a liberação da terceira geração de sementes geneticamente modificadas para resistir ao ataque de insetos, através da Liberação Comercial Soja Combinada I (SC1) (MON 87751 x MON 87708 x MON 87701 x MON 89788) resistente a insetos e tolerante a herbicidas.

Soja Combinada I

Dentro do cultivar SC1 aprovado em 2018, a Monsanto combinou o portfólio inicial da Soja Bt com mais dois outros eventos posteriormente desenvolvidos; MON 87708 da resistência ao herbicida Dicamba e MON 87751, que diversifica os tipos de δ-endotoxinas produzidas, expressando as proteínas Cry1A.105 e Cry2Ab2 derivadas da cepa Bt “kurstaki” (NAEGELI et al., 2019; FAO, 2023)

As proteínas Cry1A.105 e Cry2Ab2 já haviam sido liberadas para a cultura do milho transgênico. De acordo com o Parecer da CTNBio; “O conceito de produto da soja MON 87751 é “reduzir as atuais aplicações de inseticidas para controlar pragas lepidópteras em regiões de produção de soja onde esses insetos causam danos significativos nas plantas e perda de rendimento”. Neste sentindo, a soja MON 87751 conferiria proteção adicional contra a lagarta da soja (*Anticarsia gemmatalis*) e a falsa medideira (*Chrysodeixis includens*), os lepidópteros praga secundários como a broca das axilas (*Crocidosema aporema*), uma segunda lagarta falsa medideira (*Rachiplusia nu*), elasmo (*Elasmopalpus lignosellus*), a lagarta das maçãs (*Heliothis virescens* e *Helicoverpa zea* e H. *armigera*) e as Spodopteras (*Spodoptera frugiperda, Spodoptera cosmioides e Spodoptera eridania*). Os níveis de expressão das proteínas exógenas, ou seja, as quantidades de moléculas transgênicas em folhas e grãos expressas pela cultivar não constam dentro do parecer. Esta informação pode ser encontrada em relatório da EFSA (NAEGELI et al. 2019).

Lepidópteros (mariposas e borboletas) apresentam uma fase do desenvolvimento onde importantes células, incluindo as do intestino médio da lagarta que entram em contato toxinas Bt ingeridas, morrem e são completamente reabsorvidas por outras, durante a metamorfose (TETTAMANTI; CASARTELLI, 2019). Esses, entre outros mecanismos fisiológicos facilitam a mutação, para que as

espécies se tornem menos suscetíveis à estresses ambientais (ARORA, 2009). Isto explica a forte tendência de lagartas, como as do gênero Helicoverpa (SILVA, 2019), a desenvolver resistência a agentes tóxicos, reforçando a importância manejo. O manejo (integrado de pragas) da soja compreende outras soluções é uma decisão do produtor rural (THOMAS; COSTA, 2010). Por outro lado, a trajetória biotecnológica continua a se desenvolver no sentindo de aumentar a toxicidade para alcançar os resultados esperados por quem investe na semente, independente do manejo. Neste sentido, Intacta 2 Xtend ® fora lançada para a safra de 2022 no Brasil (DANIELI; SANTANA, 2023). Intacta 2 Xtend® é um cultivar de tecnologia baseada na expressão gênica da SC1, com foco na lagarta do cartucho (GODOY et al., 2022a).

Desenvolvedora da tecnologia Intacta®, a Monsanto do Brasil recomenda que 20% da área plantada seja com Soja não-Bt em formato de borda, bloco ou faixa, para estas áreas suscetíveis sejam refúgio e reduzam a possibilidade do aparecimento de populações de insetos resistentes (PLATAFORMA INTACTA, 2024). A expressão de uma quantidade cada vez maior e mais diversificada de proteínas exógenas que a Intensificação Biotecnológica da Soja representa responde à escolha do produtor que opta, por exemplo, por não reduzir sua produção nos 20% de área conforme recomendação. O produtor confia então à biotecnologia a responsabilidade de resolver os problemas de uma monocultura exótica, de larga escala, crescendo em ambientes como a floresta mais biodiversa do planeta. No entanto, a intensificação do portfólio de defesa da soja, se não gera um custo à saúde da planta, retira sua energia de síntese de algum outro lugar. O significado desta *escolha*, no âmbito de exigências fisiológicas e minerais cada vez maiores, será dissertado no tópico a seguir.

4.3 Demanda energética biotecnológica da SC1 no contexto do Pará

Após a liberação comercial da SC1, a escassa literatura disponível limitou-se a, inicialmente, reportar a baixa probabilidade de efeitos nocivos resultantes da combinação das proteínas inseticidas e de resistência aos herbicidas glifosato e dicamba (LEVINE et al., 2019), confirmar viabilidade do pólen, a baixa variação morfológica, valor nutricional e degradação pós-colheita, a níveis de insignificância estatística, em comparação a variantes anteriores e convencionais (JOSE et al., 2020;

LEVINE et al., 2019; VERTUAN et al., 2023). Trabalhos citados possuem declaração de conflito de interesses em razão de vínculos empregatícios.

Já com relação ao desempenho, ou seja, a letalidade aos insetos, os primeiros registros laboratoriais de populações resistentes à SC1 datam de 2022 (GODOY et al., 2022b). No Pará, a intensificação do desenvolvimento biotecnológico da soja, indicada no capítulo anterior, tem sido adotada no sentido de superar os problemas da monocultura em contato com a Amazônia. Neste sentido, SC1 apresenta uma vantagem maior, por conseguir combater maior diversidade de insetos herbívoros. O avanço da fronteira agrícola ao norte do Mato Grosso, e pelas regiões mais a sul do Pará (WEIHS; SAYAGO; TOURRAND, 2017) foi facilitado a celeridade com a qual novas biotecnologias estiveram disponíveis no mercado. Desta forma, o Mato Grosso superou o Paraná (BARCELLOS, 2014), e o Brasil se tornou maior exportador de soja do mundo, em 2023 (SILVA et al., 2023; BARBOSA, 2023).

O Brasil conta com um histórico de aprovações de novos eventos genéticos antes de países da Europa, China e Estados Unidos, a exemplo da própria SC1 (HORIKOSHI et al., 2021), e parece ignorar o Princípio da Precaução, consolidado na própria Lei de Biossegurança (art. 1º, Lei 11.105 de 2005). Isto demonstra que outras nações, independentemente da “fome” do grão ou do volume de capital adquirido por royalties, preferiram esperar a abrir seus territórios para o uso da tecnologia, comumente sucedendo liberações de importação. Seis anos depois da liberação do cultivo da soja Bt no Brasil, a Rússia justificou o banimento do cultivo transgênicos e hiper-regulação da importação, em razão dos problemas ambientais e à saúde humana observados (MATYTSIN; ANISIMOV; INSHAKOVA, 2022). A Índia cultiva apenas a modalidade não-transgênica (SNA, 2022).

No último parágrafo do livro “Textbook of Plant Physiology, Biochemistry and Biotechnology”, Verma & Verma (2007) listam 11 potenciais ameaças da utilização da tecnologia transgênica, ao recomendar que a engenharia genética e a biotecnologia sejam “reguladas por uma governança social e ética de interesse da saúde da humanidade”. Da humanidade, do ambiente e da sustentabilidade econômica dos empreendimentos rurais, pode-se adicionar. Ao longo de “Textbook of Plant Physiology, Biochemistry and Biotechnology”, Verma & Verma (2007) utilizaram a fisiologia das plantas para direcionar aplicações, técnicas e práticas bioquímicas. Importantes rotas metabólicas são descritas e revisitadas, por serem alvos de

interesse da engenharia genética. As alterações mais conhecidas até começo dos anos 2000, com foco especial a resposta ao estresse ambiental e a criação de espécies resistentes podem ser revistas.

À época da publicação, Verma & Verma (2007) não dispunham de informações suficientes para comentar a expressão fisiológica de duas proteínas de resistência a herbicidas e três tipos de toxinas diferentes na mesma planta, sem comprometer a qualidade do grão, que a tecnologia SC1 entrega. No entanto, a biotecnologia de genes Bt fora citada. O livro faz uma interessante menção num contexto de expressão transgênica das toxinas do gene Cry, à época Bt-2, "transferidos para o tabaco, tomate e algodão". A observação de Verma & Verma (2007) corrobora com os questionamentos em relação à sustentabilidade de longo prazo da sojicultura Bt, que inspiraram este capítulo;

> Toxinas Bt produzidas pelo gene Bt-2 de *Bacillus thuringiensis* são usadas como inseticida biológico. A propriedade inseticida da bactéria é devido a uma proteína chamada delta-endotoxina, sintetizada durante a esporulação. Esta é uma toxina muito *custosa* e instável em formato cristalino (crystals), nas condições de campo. (VERMA; VERMA, 2007, p. 98 do cap II)

Na passagem acima, o termo "custosa" não se encontra relacionado à temática econômica dentro do texto. Custosa e instável são qualidades fisiológicas da toxina. Em organismos de vegetais, a expressão de toxinas está normalmente relacionada a uma resposta metabólica da planta à eventos adversos. Isto é, são mecanismos de defesa acionados apenas em caso de necessidade; danos gerais, ataque de herbívoros, condições climáticas etc. Isto porque a produção de toxinas gera um *custo metabólico* à fisiologia da planta. Esta resistência induzida tem um "*fitness cost*[2]" (BALDWIN, 1998; HEIL; BALDWIN, 2002), cobrado apenas se o ataque de pragas ocorrer, podendo, portanto, ser menor do que o custo das defesas constitutivas[3] (SIMMS; FRITZ, 1990). Em alguns casos, o próprio stress pode afetar a absorção de nutrientes (VERMA; VERMA, 2007 p. 392), pois um rompimento de tecido demandará produção de defesa e de regeneração.

[2] Custo relacionado à saúde da planta, deduzido da vitalidade do organismo.
[3] Defesas constitutivas se diferem das induzidas por estarem presentes naturalmente na composição da planta, nem a necessidade de um gatilho para iniciar a síntese.

Metabolitos secundários vs. novo portfólio de defesa Bt

Embora ao longo desta dissertação pesquisas sobre o custo em *fitness* da tecnologia SC1 não tenham sido encontradas, no âmbito da expressão de toxinas naturalmente expressas por plantas ele é verdadeiro (BALDWIN, 1998; HEIL; BALDWIN, 2002; KESSLER; BALDWIN, 2004; SKOVMAND et al., 2024; VOELCKEL; SCHITTKO; BALDWIN, 2001). A evidência metabólica desse custo encontra-se geralmente associada a sintomas da saúde da planta que, com relação a soja Bt da geração anterior e nesta, ainda não foram encontrados. Isto significa que, aparentemente, a soja tem conseguido expressar as toxinas nas concentrações eficazes sem que isso sacrifique outros processos da saúde da planta.

Naturalmente, plantas possuem mecanismos de defesa cuja principal característica é serem oriundos de uma espécie de metabolismo secundário. A planta, que produz sua própria energia através da fotossíntese, separa rotas de síntese secundárias dedicadas à interação com o meio e a sua própria defesa. Metabólitos secundários (MetS) não desempenham papel no desenvolvimento normal da planta, não sendo, portanto, essenciais à sobrevivência imediata do organismo, ao contrário dos metabólitos primários, que participam da fotossíntese, respiração etc. (SINGH et al., 2023). MetS são sintetizados por rotas próprias ou a partir de metabólitos primários preexistentes dentro da seiva bruta da planta (CZAPEK, 1921; TWAIJ; HASAN, 2022), outra característica é baixa concentração no tecido celular (BOURGAUD et al., 2001).

Um conhecido efeito citotóxico[4] causado por plantas da família Urticacea, as conhecidas urtigas, é resultado do contato epitelial[5] com uma microproteína de quatro quilodaltons (4 kDa), do tipo moroidina. (ENSIKAT et al., 2021; GILDING et al., 2020; MANSOORI et al., 2017). Uma planta considerada invasora no Brasil, *Calotropis procera* (Asteracea) intoxica insetos nativos através de cardenolídeos, Calotropageninas que pesam ca. 3 kDa (LEAL et al, 2010; RANGEL; NASCIMENTO, 2011; SHARMA et al., 2012). O efeito neurotóxico da peçonha das cascavéis é resultado da concentração de crotoxinas de 23.83 kDa (RIBEIRO et al., 2012). Já as delta-endotoxinas expressas por plantas de Soja Bt e SC1 derretem o trato digestivo de uma ampla gama de insetos com singelas moléculas de aproximadamente 130 kDa (RUIZ; FERNÁNDEZ; VILLEGAS, 2008). Em um comparativo fisiológico da expressão

[4] Efeito de toxicidade a uma célula.
[5] De epitélio, contato com a pele.

Bt para com outras expressões de defesa natural de plantas e animais peçonhentos, ressalta-se o peso da proteína (em quilodaltons), e esta é uma informação importante; quanto *maior* a proteína (kDa), mais energia (quilojoules) a célula gasta para sintetizá-la. Esta característica é verdadeira e determinante, tanto dentro da ideia de Unidade Sintetizadora, que "cria" cada aminoácido, quanto para "montar" estes aminoácidos em formatos complexos, nos peptídeos e proteínas.

É possível estimar que a produção de 1 molécula de Calotropagenina, demande cerca de 245 quilojoules de energia (2 NADPH[6] na síntese do ácido mevalônico, consumindo 145 kJ/mol + 3 ATP via do mevalonato, consumindo ~100 kJ/mol) somente, sem contar o substrato (DEWICK, 2002; PANDEY et al., 2016; FREITAS, 2019), considerando a produção a partir das rotas mencionadas pelas referências. A quebra de 01 ATP[7] em ADP que doa energia para o anabolismo[8] entregaria 30,5 kJ/mol, enquanto NAD(P)Hs que permitem de anabolismo de aminoácidos MetS liberariam (ΔG) ~ 61,75 kJ/mol (WALSH; TU; TANG, 2018).

A imensurável quantidade de reações químicas que envolvem o trabalho de transformação de simples átomos em matéria orgânica executadas pelas plantas, em especial as que expressam proteínas exógenas, impossibilita determinações exatas, assim como a maioria dos sistemas e modelagens quem envolvem organismos vivos. Desta forma, de maneira conservadora, algumas extrapolações são aceitas dentro dos modelos propostos nesta, e na seção 4.3.

Aparentemente, com a exceção das altas quantidades de triptofano que vem sendo encontradas na soja transgênica, não há diferença significativa em quantidades e tipos de aminoácidos expressos pela variante transgênica com relação a tradicional (ISHIMOTO et al., 2010; KUDELKA; KOWALSKA; POPIS, 2021). A diferença parece estar em mais aminoácidos livres e ou acumulados dentro de outros tipos de proteínas, ao invés das tradicionais Glicinina (11S globulina) e β-Conglicinina (TAKAHASHI et al., 2003). Dito isto, com as produtividades que as tecnologias apresentam conforme visto no Capítulo 3, com as quantidades de proteínas e toxinas descritas por Naegeli et al. (2019) anteriormente vistas na Tabela 1 e o aparente vigor

[6] NADPH, ou nicotinamida adenina dinucleótido fosfato é uma coenzima que transporta elétrons, doando energia para as reações, e tornando-se NAD.
[7] Adenosina trifosfato é a principal molécula carregadora de energia que se transforma em Adenosina Difosfato (ADP) quando doa energia.
[8] Montagem de moléculas mais complexas a partir de moléculas mais simples.

que as plantas Bt apresentam, se não há sacrifício de nenhuma função fisiológica, *deve* haver mais energia livre no sistema vegetal para a síntese adicional de aminoácidos. No tópico a seguir, disserta-se sobre algumas modelagens possíveis capazes de estimar tal demanda, desenvolvidas como resultado deste trabalho.

Modelagem da Demanda de energia extra por expressão de proteína exógena (DEEPE)

A energia extra demandada pela expressão de proteínas exógenas na IBtS compreende, necessariamente, uma exigência nutricional adicional. Ignorar este fato equivale-se a desacreditar as mesmas Leis e mecânicas que regem diversas modelagens produtivas, tanto as baseadas na Lei dos Mínimos de Liebig, quanto as que consideram construção de biomassa à partir de substrato (KOOIJMAN, 1998). As mesmas Leis que regem a mecânica dos modelos que predizem a produtividade de uma cultura de acordo com a composição do solo, e.g. modelo aditivo, unidade sintetizadora (TANG; RILEY, 2021), explicam vários dos processos de transformação de energia celular em biomassa vegetal. Segundo Tang & Riley (2021), a LLM, e demais modelos citados foram construídos através de uma mecânica baseada na Lei da Ação de Massas – que descreve a relação entre as concentrações de reagentes e a velocidade de uma reação química. Isto posto, cada unidade de proteína exógena criada demanda (mais) nutrientes (reagentes) e quanto maior a concentração destes, maior a velocidade de síntese.

Ainda segundo Tang & Riley (2021), as modelagens em LLM têm sido superadas por atualizações biogeoquímicas, sendo as mais “sensíveis” os modelos que consideram a “unidade sintetizadora” (SU model) que constrói biomassa a partir de dois substratos A e B, conforme revisitado no Anexo A. O conceito de Unidade Sintetizadora de Kooijman (1998) é um conceito-chave na apresentação do modelo ao qual este tópico se propõe a dissertar. A unidade sintetizadora pode ser interpretada como o momento em que, dentro do citoplasma, as reações bioquímicas permitem a criação de aminoácidos e, posteriormente, proteínas. Essa criação de aminoácidos é feita tanto a partir das moléculas disponíveis, quanto da energia disponível. A presença de energia disponível, ou seja, de moléculas chamadas de “carregadoras de energia” (ADP, ATP, NADP, NADPH etc.) catalisa as reações químicas de síntese de aminoácidos, que depois tornam-se as toxinas inseticidas, por

exemplo. Cada um dos 20 aminoácidos essenciais sintetizados pelas plantas compreendem uma rota metabólica específica que conta com um gasto energético particular, de forma aproximada pode-se dizer que, entre três e dez unidades de energia são necessárias, a cada aminoácido (Anexo B).

Neste sentido, considerado que apenas uma das colunas comuns às delta–endotoxinas (a α5) possui 23~30 aminoácidos (GAZIT; SHAY, 1993), se cada aminoácido gastar 2 ATP e 1 NADPH, a produção de uma única molécula da toxina custa à célula (ipso facto ao meio/substrato) um mínimo de 3542 kJ/mol. A modelagem apresentada se aproxima de explicar os valores em kJ/mol para síntese de aminoácidos, a 18º C, encontrados por Amend & Shock (1998).

Variando em (n) número de ATP e NADPH, este modelo de demanda de energia extra em função da expressão transgênica de proteínas pode ser aplicado de duas formas:

a) Quando a quantidade de (a) aminoácidos da molécula conhecida;

$$\delta J = [(nNADPH \times 30{,}5\ kJ/mol) + (nATP \times 61{,}75\ kJ/mol)] \times a$$

b) Quando o peso da molécula é conhecido, peMol e está kDa, sobre o peso médio de um aminoácido (110Da), em Daltons;

$$\delta J = [(nNADPH \times 30{,}5\ kJ/mol) + (nATP \times 61{,}75\ kJ/mol)] \times (\frac{peMol \times 10^3}{110})$$

BRS 1003IPRO, cultivar com tecnologia Intacta® criado pela Embrapa, promete produtividades acima de 6 toneladas por hectare, com teor de 37,5% proteína no grão (EMBRAPA, 2023). Se este cultivar for capaz de expressar 3% de δ–endotoxinas (130kda) no total de proteína solúvel (LEE et al., 2013) da semente, é possível estimar quanto de energia extra a tecnologia demanda, por parte da expressão transgênica Bt (de δ–endotoxinas, 3%). Da mesma forma, se a concentração em µg/g do peso seco é conhecida, e δJ assumir a proporção mínima (3542 kJ/mol por δ–endotoxina), a estimativa (δJ(ha) em kJ/ha) segue os seguintes modelos (c e d), respectivamente, a depender dos valores supracitados, quando conhecidos.

c) Onde NA é a constante de Avogadro, P é a Produtividade da cultivar em quilos por hectare, tPc o percentual de teor proteico do grão, tPtrans o percentual de Proteína transgênica do total (TSP);

$$\delta J(ha) = N\text{A}\,(\frac{P[(tPC\ x\ 100) \times (tPtrans\ x\ 100) \times 10^3]}{pMol\ x\ 10^3\ (g/mol)}) \times \delta J$$

d) Se a (C) concentração (µg/g) do peso seco é conhecida, δJ(ha) pode ser calculada da seguinte forma;

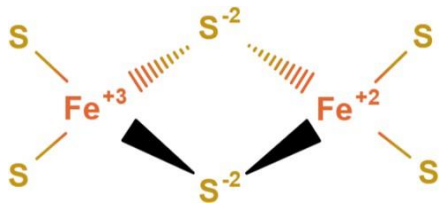
$$\delta J(ha) = N\text{A}\,(\frac{[(P\ \times 10^3) \times (C\ \times\ 10^3)]\mu g}{1 \times 10^6}) \times \delta J$$

Ao aplicar o modelo (c), podemos estimar que a DEEPE (δ–endotoxinas) da cultivar BRS 1003IPRO apresente-se em, pelo menos (23a), 1.875 x 10^{31} vezes 3542 kJ/mol, por hectare cultivado inteiramente com a tecnologia.

Em teoria, a δJ(ha) encontra-se armazenada a nível subatômico, nas ligações químicas das proteínas exógenas, neste caso, destes 3600 kg de sementes de Soja BRS 1003IPRO.

É importante ressaltar que, a depender da rota necessária, da síntese da glicose à formação do aminoácido este custo energético deve variar. Quanto mais reações e rotas metabólicas envolvidas, mais energia ele demanda, variando em ATP/ADP e NAD/NADH/NADPHs de acordo com cada aminoácido. Nas células vegetais a regeneração destas unidades de energia (cofatores) é crucial para a síntese de aminoácidos. Da mesma forma que doam energia para a biossíntese, precisam ser recarregados para posterior utilização (BARTEK et al., 2010). Dentro da usina de força da célula vegetal, o cloroplasto, existe um pequeno “cabo de força”, que não somente inicia a cadeia de transporte de elétrons (energia) de fora para dentro do estroma, como é a principal fonte de energia para a recarga e produção de novas moléculas NADPH através da redução de NADP+; a ferredoxina (2Fe-2S) (BARTEK et al., 2010; HANKE; MULO, 2013) (Figura 5).

Figura 5 - Representação molecular do cluster de uma ferredoxina redutora [2Fe-2S], com cargas.



Fonte: Elaboração da autora, adaptado de MetaNetX.org, criado com MolView.

Duas moléculas de ferro (Fe) e duas moléculas de enxofre (S) ligadas a quatro cisteínas (S do aminoácido) formam a Ferredoxina. A energia da Ferredoxina reduzida (carregada) compreende um elétron armazenado em uma das moléculas de Fe+2, que oxida a Fe+3 (KHETKORN et al., 2017). A partir desta determinação bioquímica, pode-se inferir que *o Ferro é um nutriente indispensável à disponibilidade de energia intracelular*.

Para além do Gusa: A IBtS nos solos paraenses

De forma irônica, o parágrafo de abertura do capítulo “Importância do Ferro para os Sistemas Biológicos” do livro “*Inorganic Biochemistry of Iron Metabolism: From Molecular Mechanisms to Clinical Consequences”* menciona que “desde o advento do oxigênio na atmosfera terrestre, a biodisponibilidade do ferro foi seriamente comprometida”. Ao citar a capacidade redutora do metal e a importância na doação de energia, o autor termina sentença afirmando que é fácil entender o porquê de o ferro ser virtualmente essencial à vida (CRICHTON, 2009).

Na cultura da Soja a ausência de Ferro disponível causa uma fitopatologia específica; a clorose por deficiência de ferro. Afortunadamente, fenótipos capazes de resistir a doença já foram identificados (WANG et al., 2008), isto, depois da estabilização da transgenia de resistência a deficiência de ferro, por melhoramento na estratégia de absorção da Soja (VASCONCELOS et al., 2006).

Para além do Gusa de Carajás, que abarrota os intermináveis vagões que diariamente cruzam o rio Tocantins em Marabá, os solos vermelhos das regiões ao Sul do Pará também são ricos nas formas biodisponíveis de Ferro (orgânico Fe2+), e inorgânico de alta disponibilidade (Fe 3+), de absorção facilitada pelo pH alto teor de matéria orgânica (LIMA, 2001). Nos solos Paraenses, cuja classificação “ferrálicos”

(Latossolos e Argissolos) compreende mais de 80% do Estado (GAMA et al., 2020), recomendações de reposição do micronutriente para o Estado do Pará não foram encontradas. Segundo Fernandes et al. (2018), os solos do estado possuem um teor médio de 4.67 ± 2.8 g/dcm³ Ferro solúvel. Na pesquisa brasileira, as recomendações de reposição costumam a indicar cobalto e molibdênio, resguardadas as proporções, pois o excesso de cobalto fora a única causa da fitopatologia encontrada na literatura (SFREDO; OLIVEIRA, 2010).

Foi reportada a capacidade de extração de Ferro em uma cultura de soja no estado do Paraná alcançando 460kg por tonelada de grão produzida (COSMO et al., 2023) e 70kg/ha de exportação. Isto implica dizer que, para aquele cultivar, a cada safra o hectare é desmineralizado em 460 kg de ferro biodisponível, e perde 70kg/ha (exportação). Onde cultivares transgênicos e convencionais se assemelha em valor nutricional, o custo energético do portfólio de defesa mencionado não é expresso em detrimento da saúde da planta ou de sua capacidade produtiva. No entanto, na Natureza, *não existe almoço grátis*. Onde nada se perde, nada se cria e tudo se transforma, é esperada uma correspondência mineral à demanda energética extra da IBtS. E não somente de Nitrogênio, Fósforo e Potássio (NPK). Na próxima seção uma terceira modelagem é apresentada, decompondo-se a partir das modelagens SU aqui apresentadas; considera-se um micronutriente capaz de atender à energia necessária a adoção da tecnologia, fortuitamente, também o micronutriente indispensável à vida e abundante nos solos paraenses; o Ferro.

4.4 Deterioração do Ativo por Desmineralização

A edição transgênica de uma célula vegetal se, por um lado induz a expressão de moléculas de interesse, por outro, encontra seus limites onde tudo que ocupa lugar, espaço e apresenta peso os tem. Portanto, quanto mais complexas as moléculas que uma planta precise expressar, maior será a demanda por matéria e Entalpia; recursos renováveis (e.g. energia solar) ou não (e. g. minerais no solo, fertilizantes). A edição pode torná-la capaz de absorver mais nutrientes (BENDER et al., 2013; BENDER; HAEGELE; BELOW, 2015; KUMUDINI; HUME; CHU, 2002; PÉREZ-MASSOT et al., 2013; SHELKE et al., 2023b; ZHU et al., 2007) todavia, nenhuma alteração genética poderia fazer com que a célula produzisse mais proteínas com a mesma quantidade

de recurso total disponível pois isto, além de negar o já testado (TANG; RILEY, 2021) modelo de síntese de biomassa (SU) de Kooijman (1998), iria de encontro às leis e mecânica das reações físico-químicas. Sabe-se que quando um mínimo de recurso necessário para a síntese proteica não é atingido, a cultura pode, inclusive, não se desenvolver (Lei dos Mínimos). Disto isto, começa-se a questionar a ideia *"*mesmo investimento com maiores produtividades" propagandeada sobre a biotecnologia, nos anos 2000 (MCLAREN, 2005).

Dentro deste contexto, pode-se dizer que o produtor rural, que opta por resolver os problemas da monocultura com a biotecnologia, especialmente os que os fazem em detrimento de outros tipos de manejo, assumiriam um *custo* relativo à correspondência da expressão fisiológica exógena. Este custo, apesar poupar a liquidez (inputs), encontraria sua correspondência dentro da eficiência na exploração do ativo, ou seja, na conversão de minerais do solo em energia e proteínas exógenas adicionais, podendo ser, a partir disto, quantificado.

Neste sentido, além da possibilidade de construir uma estimativa de deterioração do ativo solo por desmineralização, baseada na extração aproximada de um mineral, surgem possibilidades mais, como novos parâmetros sobre custo de reposição e estimativas de esgotamento do estoque natural, de maneira matemática. Aqui, o mineral escolhido fora o Ferro, em razão da importância celular e da abundância nos solos paraenses, recorte geográfico deste trabalho.

Estimar a degradação do ativo terra por desmineralização com base na intensificação biotecnológica de uma monocultura é uma tarefa interdisciplinar, que requer vários graus de entendimento, sobre diversas áreas do conhecimento. A primeira área necessária seria a própria biotecnologia, através do sequenciamento genético dos aminoácidos de cada proteína transgênica. Aminoácidos essenciais podem ser metabolizados ou catabolizados (produzidos a partir de outra molécula maior), sempre através de um gasto de energia. Cada um dos diferentes aminoácidos que compreendem a produção de uma delta-endotoxina Cry1Ac, por exemplo, é sintetizado a partir de um precursor. Cada aminoácido essencial depende de uma rota metabólica principal originada da fosforilação da glicose (respiração celular). Desta forma, esta estimativa se apresentará inacurada (1) pela não-determinação exata do custo energético da proteína exógena; (2) pela proporção hipotética de Ferredoxinas carregadas livres por aminoácido.

De maneira conservadora, neste modelo considera-se que para cada unidade de proteína transgênica sintetizada, a planta necessite extrair 2 mol de ferro (2Fe) *a mais* do solo, em razão da produção de uma única Ferredoxina [2Fe-2S] carregada livre, independentemente da quantidade total de (a) aminoácidos, e gasto (n) NADPH e ATP envolvida na síntese. A partir disto;

a) Correspondência mineral relativa, onde nM é o número de moléculas de mineral que se espera corresponder à expressão de proteína de peso (peMol) em kDa na concentração (C) determinada, na folha ou no grão;

$$\delta m = N_A \left(\frac{(C \times 10 - {}^{6})}{pMol\ x\ 10^3}\right) nM$$

b) A produtividade determina a quantidade de Fe extra necessária (g) para a síntese da proteína exógena, em gramas por hectare; encontra-se quando a massa molar do mineral (MMn) que se espera corresponder à expressão é multiplicada por P (em kg) e δm, em razão da Constante de Avogadro;

$$\delta m(\text{ha}) = \left(\frac{\delta m(P \times 10^3)}{N_A}\right) MMn$$

A partir da segunda geração, as plantas transplantadas com genes Cry passaram a contar com delta-endotoxinas em seu portfólio de defesa contra agressores. Delta-endotoxinas, ou δ–endotoxinas, são conhecidas por causar danos letais e sub-letais a insetos e organismos nocivos de outras classes. Na primeira geração (MON 89788) a soja expressava proteínas capazes de tornar a planta resistente ao herbicida Glifosato. A variante da 5-enolpiruvilchiquimato-3-fosfato sintase capaz de resistir ao Glifosato (CP4EPSPS) pesa (peMol) 47.6 kDa e pode ser encontrada na (C) concentração de 180 ± 26 µg/g na semente e 400 µg/g do peso seco da folha adulta (NAEGELI et al., 2019). Considerando o modelo de correspondência mineral (Fe, nM=2) e uma produtividade média de 3000kg por hectare (média no Pará, m1, 2003), a adoção da Soja RR (MON 89788)

corresponderia uma deterioração mineral adicional de 1,22g/ha com a venda do grão e, de 2,69 g/ha, com a remoção da palhada de peso equivalente.

c) Aplicando a Correspondência mineral relativa aos valores conhecidos;

$$\delta m = N_A \left(\frac{180 \times 10 - ^{6}}{47{,}6 \times 10^{3}}\right) 2$$

d) Valor de δm(ha) para a produção de Soja RoundUp Ready® no Pará, em (2003), encontrar-se-ia através da seguinte solução;

$$\delta m(ha) = \left(\frac{4{,}5522 \times 10^{15}(3000 \times 10^{3})}{N_A}\right) 55{,}845 g/mol$$

Ao determinar um valor (em quilojoules por hectare) demandado pela expressão de proteínas exógenas (SU) DEEP capaz de corresponder a uma possível desmineralização a partir das modelagens de Variação mineral por hectare δm(ha) propostas neste trabalho, apresenta-se esta possibilidade; a adição de uma variável químico-genético-biomolecular, a ser considerada nos fluxos de reposição de micronutrientes do solo.

A seguir, a tabela 4 compreende o cálculo da variante δm(ha) para todos os eventos da Intensificação Biotecnológica da Soja autorizados no Brasil, reportados pela Autoridade Europeia para a Segurança Alimentar (NAEGELI et al., 2019), a partir de valores de P nas médias de IBtS por período no Pará anteriormente utilizadas (Capítulo 3), e de uma correspondência mineral relativa de Fe (nM=2). As categorias (S) semente e (F) folha podem ser utilizadas para representação dos cenários de extração e de exportação do mineral.

Tabela 4- Estimativa de desmineralização baseada no modelo de Variação mineral por hectare (δm/ha) em Ferro, a partir da extração de folhas (F) ou da exportação de Sementes (S), de acordo com o tipo de biotecnologia abarcada na semente de soja.

IBtS (Ano de lançamento)	**Evento**	**Gene adicionado**	**Proteína exógena**	**Peso**	**C média* (F) folha**	**C média/ (S) Semente**	**δm(ha) (S)**	**δm(ha) (F)**
				kDa	*µg/g*	*µg/g*	*g/ha*	*g/ha*
RoundUp Ready® (2003)	MON 89788	cp4 epsps	✓ 5-enolpiruvilxiquimato-3-fosfato sintase (EPSPS)	47.6	~400	180 ± 26	1,211	2,692
Intacta® (2010)	MON 87701-2 x MON 89788	cp4 epsps cry1Ac	✓ EPSPS ✓ Cry1Ac delta-endotoxina	47.6 135	~400 2,100 ± 960	180 ± 26 7.0 ± 1.1	1,211 0,017	2,692 5,227
						Total=	**1,228**	**7,919**
Soja Combinada I® (2018)	MON 89788 x MON 87701 x MON 87708 MON 87751	cp4 epsps cry1Ac dmo cry2Ab2 cry1A.105	✓ EPSPS ✓ Cry1Ac delta-endotoxina ✓ Dicamba mono-oxigenase ✓ Cry2Ab delta-endotoxina ✓ Cry1A.105 (mutação de Cry1A, Cry1F e Cry1Ac)	47.6 135 39.5 120 + 132.9	320 ± 65 2,100 ± 960 23 ±21 22 ± 5.0 + 1,400 ± 490	180 ± 26 7.0 ± 1.1 13 ± 3.8 2.7 ± 1.1 + 3.7 ± 0.94	1,211 0,017 0,112 0,008 0,010	2,692 5,227 0,198 0,062 3,602
						Total=	**1,358**	**11,781**

Fonte: Elaboração da Autora, concentrações médias apresentadas por Naegeli et al. (2019).

A Correspondência mineral relativa é a uma variável qualiquantitativa de peso hipotético-dedutivo. Desta forma, (1) Considera-se que a planta retira do solo o mínimo necessário para a síntese das moléculas de sua atividade fisiológica, ignorando comportamentos de Hiper acumulação (KRÄMER, 2010) e; (2) que tal quantidade mínima passa a ser maior em razão da maior energia necessária para síntese proteica exógena. Dadas as hipóteses, infere-se que o Ferro, em razão da importância fisiológica das Ferredoxinas, figura-se entre os micronutrientes sobre exigidos. Isto posto, a quantificação de ðm(ha) é então calibrada por uma correlação lógica entre o número de moléculas de mineral (nM) e a energia necessária para a expressão da(s) proteína(s) exógena(s).

Na modelagem DEEPE, cada unidade de energia necessária à síntese é contabilizada de forma aproximada. Já o modelo ðm(ha) proposto afasta-se da realidade ao considerar que a molécula de proteína exógena, independentemente do tamanho ou dos tipos de aminoácido que a compõe, exige da célula a fixação de 2Fe, correspondente a 1mol de Ferredoxina [2Fe=2S]. Neste cenário hipotético, além da extrapolação 1 mol NADPH/aminoácido da proporção DEEPE (2ATP + 1 NADPH por a), considera-se também que um único mole de Ferredoxina extra energize todos os NADP de todas as etapas das rotas metabólicas de todos os aminoácidos da toxina.

Com 135 kDa, a toxina Bt Cry1Ac delta-endotoxina possui, aproximadamente 1227 aminoácidos. Hodierna abordagem pode supor que a síntese adicional de 1 mol Ferredoxina consiga regenerar somente 10 mol NADPH a mais, escalando o valor de nM sobremaneira (proporção DEEPE, 1a=1NADPH, nM=224). Às produtividades médias no Pará, nos momentos de IBtS, a expressão desta delta-endotoxina custaria mais 0,19 kg de Ferro orgânico, por hectare de grão colhido. Sendo a palhada for removida do local de origem, 59,81 kg/ha passariam a ser necessários à reposição mecânica.

O próximo modelo constitui-se em um modal de importância econômica para as considerações do custo produtivo da agricultura da soja, referenciando-se na produtividade média da IBtS no estado do Pará. A avaliação da Deterioração do Ativo por Desmineralização leva em consideração o valor da reposição da quantidade de mineral anteriormente determinada, através de uma variável de mercado FeS em

reais, aqui classificada como o preço (R$) do Sulfato de Ferro 20% ($FeSO4-H2O$), 50kg.

$$D_A D = FeS \times \frac{[(\frac{1}{\%}) \times \delta m(ha)]}{50}$$

A avaliação da Deterioração do Ativo por Desmineralização compreende a variação do custo de reposição a depender da concentração do fertilizante, seu preço e do tipo de abordagem (nM) considerada em δm(ha). Ela corresponde ao valor que o proprietário do ativo “terra agriculturável” precisará investir para retornar o mineral ao solo, quando for necessário. Desta forma, a fim de salvaguardar investimentos, na tabela a seguir a estimativa de Deterioração de um Ativo solo por Desmineralização apresenta-se estimada em ambas as abordagens e pesos de correlação nM anteriormente mencionadas para as modalidades Bt, e para a intensificação biotecnológica atual, Soja Combinada I.

Tabela 5- Deterioração do Ativo por Desmineralização de acordo com a correlação entre o número de moléculas de mineral e a expressão exógena admitida.

Nome Comercial	**DAD (nM=2) (S)**	**DAD (nM=244) (S)**	**DAD (nM=2) (F)**	**DAD (nM=244) (F)**
	(R$ por hectare)			
Intacta®	0,0712	719,38	0,4593	5.044,40
Soja Combinada I®	0,0787	1.587,68	0,6843	9.225,76

Fonte: Elaborada pela Autora.

Latossolos são uma categoria de solo geralmente classificados pelo progressivo teor de argila em seus horizontes (camadas) pouco definidos. Com altas concentrações de ferro e alumínio, latossolos, em suas diversas categorias, cores e teores minerais compreendem 40,78% dos solos ferrálicos do Pará (NACHTERGAELE, 2017; GAMA et al., 2020). O avanço biotecnológico que intensifica a eficiência com a qual se explora o recurso solo não necessariamente representa um aumento na lucratividade global, como visto no capítulo anterior. No entanto, em decorrência do aumento de eficiência da biotecnologia, sempre haverá um maior custo de reposição. Sobre os solos ferrálicos do Pará, o custo do ferro orgânico não é deduzido da liquidez; o valor do micronutriente imprescindível aos processos biológicos dos organismos vivos é subtraído do ativo imobilizado.

Apesar das dificuldades em se estimar os estoques totais nutrientes apontadas por (RESENDE et al., 2019), resultados de análises químicas de quatro tipos de latossolos amazônicos, obtidos por Rodrigues (1998), apresentaram na camada 0-20 cm o conteúdo de Ferro Total (mg/kg-1) nas seguintes concentrações: Latossolo amarelo (1) 25713,1 mg/kg-1, Latossolo amarelo (2) 56157,5 mg/kg-1; Latossolo amarelo (3) 5636,3 mg/kg-1, Latossolo húmico (LH) 59845,0 mg/kg-1. Rodrigues (1998) obteve o conteúdo de Ferro total dos solos através dos extratores Mehlich 1 e DTPA. Quantidades de ferro na forma solúvel presentes em amostras de solos ferrálicos das regiões norte e centro-oeste foram comparadas com a média de ferro solúvel de solos do Pará (RODRIGUES, 1998), e um quantitativo obtido através de cessão de análises de privadas em área de latossolo, no Sudeste do Pará, como exposto na Tabela 6.

Tabela 6 – Quantidades de ferro solúvel (DTPA e Mehlich) presentes em amostras de solos ferrálicos do Norte e Centro-oeste do País e média de ferro solúvel de solos do Pará.

Tipo de Solo	**Coordenadas**	**Região**	**pH**	**Conteúdo de Fe Solúvel**	**Autor**
				(mg/dm³)	
Latossolo Amarelo I		Norte	3,5	157	Rodrigues (1998)
Latossolo Amarelo II		Norte	3,89	48	Rodrigues (1998)
Latossolo Amarelo Distrófico I		Norte	4,19	87	Rodrigues (1998)
Latossolo Amarelo Distrófico II	3°32'S 57°41'W	Norte	5,02	144,19	Pereira et. al (2010)
Latossolo Vermelho-Amarelo (A)	8°23'S 50°98'O	Norte	5,2	512	Dados de manejo privado cedidos ao autor
Latossolo Vermelho-Amarelo I	-19°49'S - 43°21'W	Centro-Oeste	4,35	66,03	Ferreira et al. (2021)
Latossolo Vermelho-Amarelo II	-19°42'S - 43°28'W	Centro-Oeste	4,69	50,36	Ferreira et al. (2021)
Latossolo Vermelho-Amarelo III	-19°57'S - 43°24'W	Centro-Oeste	4,65	20,46	Ferreira et al. (2021)
Latossolo Vermelho-Amarelo IV	-19°21'S - 42°34'W	Centro-Oeste	4,96	37,93	Ferreira et al. (2021)
Latossolo Vermelho I	-18°48'S - 42°36'W	Centro-Oeste	4,75	56,67	Ferreira et al. (2021)
Latossolo Vermelho II	-18°31'S - 42°44'W	Centro-Oeste	4,43	70,94	Ferreira et al. (2021)
Latossolo Vermelho III	-18°39'S - 43°05'W	Centro-Oeste	4,72	33,33	Ferreira et al. (2021)
Latossolo Vermelho-Amarelo V	-19°13'S - 42°19'W	Centro-Oeste	4,39	56,54	Ferreira et al. (2021)
Latossolo Vermelho IV	-19°27'S - 44°14'W	Centro-Oeste	5,63	37	Ferreira et al. (2021)
Latossolo Vermelho Distrófico I	-20°55'S - 46°59'W	Centro-Oeste	5,4	15,73	Ferreira et al. (2021)
Média de ferro solúvel		*Pará*		467	Rodrigues (1998)

Fonte: Elaborada pela Autora, com dados das fontes na tabela citadas.

A partir da definição do conteúdo de ferro total do solo (FeT), o modelo de Deterioração do Ativo por Desmineralização DAD pode gerar uma estimativa de esgotamento dos estoques do mineral, considerando uma determinada camada (i.e. 0-20cm), em razão dos diferentes níveis de intensificação biotecnologia. Aqui, DaDe apresenta-se como estimativa de esgotamento total, em safras. Na fórmula, “d” corresponde à densidade do solo que se pretende analisar, e “Ex” a uma variável que indica extração (em quilos, e. g. 450kg/ha, remoção de palhada/produção de forragem) ou exportação (e. g. 70kg/t, referente ao grão comercializado) de Ferro por tonelada de grão conforme literatura, em quilos. A P (produtividade) desconsidera áreas de refúgio (20%) neste modelo.

$$DAD_e = \frac{FeT(2\mathrm{d})}{[(\frac{\mathrm{P}}{1000}) \times \mathrm{Ex}] + \delta\mathrm{m(ha)}}$$

A Tabela 7 exemplifica o cálculo do DAD*e* com dois cenários hipotéticos possíveis para a exploração mineral agrícola da soja transgênica em Latossolos do estado do Pará. Desta forma, as produtividades consideradas são as médias dos momentos de IBtS correspondentes ao cenário biotecnológico analisado (P1= 3014,44, P2= 3046,75). No primeiro cenário, considera-se como sendo melhor possível para a continuidade das atividades agrícolas de um estabelecimento rural e, o segundo cenário, a partir de estoques minerais, práticas de manejo e escolhas biotecnológicas potencializadas por uma correspondência mineral pessimista (nM=244). Desta forma, tem-se;

a) Produção de sementes por Plantio direto na palha, Correspondência mineral relativa conservadora (nM=2), IBtS Intacta® (δm(ha)= 1,22g/ha) sobre estoques de Ferro Total de um latossolo com 25713,1 mg/kg-1 na na faixa 0-20cm, densidade 1,3g/cm³ (RODRIGUES, 1998). Considerando os níveis de exportação, ao remover somente a semente do sistema, descritos por Resende et al. (2019), como melhor cenário;

b) Remoção da palhada (ou biomassa) completa, correspondência pessimista (nM= 244, cada 1mol Ferredoxina extra regenerando 10 NADPH por unidade de proteína exógena), IBtS Intacta 2 Xtend® (δm(ha)=74.524g/ha), estoques de Ferro Total de um latossolo em 5636,3 mg/kg-1, na faixa 0-20cm com densidade de 0,9g/cm³ (RODRIGUES, 1998). Considerando os níveis de extração, ao remover toda a biomassa produzida no sistema, reportados por Cosmo et al. (2023).

Tabela 7 – Estimativa de esgotamento pela deterioração do ativo por desmineralização para dois diferentes cenários possíveis, em safras.

	FeT	*d*	*δm(ha)*	*Tx Ex*	*DADe*
	mg/kg-1	*g/cm³*	*g/ha*	*Kg*	*Safras*
Cenário A	25713,1	1,3	1,22	0,065	**~339,14**
Cenário B	5636,3	0,9	74524	450	**~6,87**

Fonte: Elaboração da Autora.

A resolução do problema da resiliência evolutiva inerente às populações de insetos, em especial as que sofrem Metamorfose e são continuamente expostas à tecnologia Bt, tem sido defendida pela Indústria no sentido da seleção de novas tecnologias a níveis de “superexpressão”; por figurar uma espécie de alta-dosagem crônica, e não haver registros de resistência à alta dosagem de delta-endotoxinas (TABASHNIK, 1994; ALTIERI, 2000; GRYSPEIRT; GRÉGOIRE, 2012; GARCÍA et al., 2023).

A tecnologia de segunda geração soja Bt, que já esteve presente em eventos comerciais amplamente difundidos na trajetória (acima de 70% do mercado de sementes e. g. INTACTA RR2; NOVAES, 2017) tende a ser substituída pela SC1. Atualmente, a tecnologia das células vegetais editadas tem alcançado o patamar de “hiperexpressão”, o que significa que as moléculas de interesse já chegaram a mais de 70% do total de proteínas expressas pela planta (JABEEN et al., 2010; JIN; DANIELL, 2015) de forma estável. Isto demonstra que o paradigma atual da IBtS já possui portfólio tecnológico suficiente para lançar no mercado cultivares capazes de

expressar concentrações de proteína exógena cada vez maiores, no momento em que for preciso e em resposta a nada menos que a Seleção “Natural” dos organismos-alvo.

Urge então, a necessidade de aprofundar os modelos apresentados através do fechamento das questões, sobre tantas variáveis quanto possíveis. Para que, de posse de dados reais sobre o que sai, quanto sai, e a que custo sai do ativo em razão das escolhas de sementes e manejo que fazem, os empreendimentos rurais disponham de mais acurada análise para a decisão sobre qual agricultura desenvolver, nas terras agrícolas do Pará. Esta modelagem (DAD*e*) é uma ferramenta de auxílio à continuidade das atividades econômicas no meio rural, e um apelo – ao futuro da Agricultura Sustentável. Isto pois, uma agricultura que ignore o valor de um nutriente fundamental à manutenção dos processos da vida como o Ferro portanto, indiscriminadamente o explore, entra inexoravelmente em uma lógica similar à economia do esgotamento (Raubwirtschaft) observada por Liebig, no século XXI. A força de exploração da agricultura brasileira na atualidade, ostentada nas mais de 100 milhões de toneladas de soja exportadas ao ano, também aproxima a economia rural de uma Falha Metabólica. Tão logo se esgote no solo, tão cedo se entenderá a importância do retorno da matéria ao local de origem. E, quanto mais a heurística se aproximar da existência matemática de uma Correspondência mineral relativa, mais próximo o modelo estará de materializar uma estimativa de esgotamento.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No curso dos caminhos para o desenvolvimento Agrário do Pará, a perspectiva da Questão do Carvão tem posicionado a explanação das incongruências, entre causa e efeito do aumento da demanda por terra, dentro de um contexto comportamental de livre mercado. Logo, explicar o porquê de uma intensificação biotecnológica, que resulta em aumento de produtividade, acabar por direcionar a trajetória sobre novas áreas, ao invés de poupá-las, tem ficado a cargo das leis da economia.

Ao longo desta dissertação, à lei da oferta e demanda que, indubitavelmente impactou o crescimento em AP do Pará nesta última década, somaram-se cinco outras leis de outras grandes áreas do conhecimento, envolvidas no processo de aumento

de produtividade da monocultura, a rigor; LLM, Guldberg-Waage, Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica e Lei de Lavoisier.

A observação do paradoxo da eficiência na Inglaterra (JEVONS, 1866) insere-se em um contexto industrial de motores à combustão, do ano de 1866. Precisamente dezesseis anos depois desta, é que a soja foi inserida em território brasileiro e, desde então, mudanças drásticas envolveram os fatores; na economia brasileira, no mercado mundial de comodities e, especialmente, no germoplasma predominante na soja do Brasil.

No decorrer desses quase dois séculos que separam o paradoxo da atualidade, a soja chega e se desenvolve, tornando-se o carro chefe do superávit agrário nacional. Edições no genoma da leguminosa garantiram a viabilidade da monocultura no Pará, possibilitando crescimento de aproximadamente 2.900% em Área Plantada nas últimas duas décadas, como visto no Capítulo 3. O paradoxo, comumente relacionado como situação oposta à Hipótese de Borlaug, é reafirmado, a cada vez que a intensificação biotecnológica ocasiona um aumento global na demanda pela comodity "terra agriculturável", ainda que o aumento da competitividade não resulte em queda no preço da saca, tão pouco no preço da terra em si, como também observado ao longo do Capítulo 3.

Neste sentido, considera-se a necessidade de um questionamento sobre a validade lógica do que se afirma, ao negar a hipótese. Primeiramente, sabendo que a soja é uma espécie exótica que sequer seria capaz de sobreviver à secura do Cerrado, ou a biodiversidade das espécies silvestres de plantas e insetos da Amazônia, como entender a intensificação biotecnológica a partir de uma perspectiva que reduza o crescimento de área plantada, ao invés de aumentar, como infere a Hipótese de Borlaug?

Interessantemente, é a partir da negação da hipótese a qual defende a inovação agrobiotecnológica como promotora de *land-sparing*, que se apresenta um paradoxo que normaliza e normatiza esta ideia. Qual seja, a de que a intensificação no uso da terra deveria poupá-la e, quando não o faz, isto é, na verdade, antagônico; mas explicável pelas forças de mercado. O paradoxo de Jevons aplicado ao caso da terra, além de validar a lógica da hipótese de Borlaug, mesmo ao negá-la, posiciona o mercado em um processo passivo, capaz provocar efeito "inesperado".

Ao explicar as teorias da mudança tecnológica, Dosi (1982) posiciona o mercado de duas formas; uma ativa e a outra reativa. A inovação “puxada pela demanda” seria então uma resposta às preferencias dos consumidores, onde o mercado é o motor de inovação, enquanto a mudança “impulsionada pela tecnologia” seria um processo mais reativo do que protagonista, quando existem pesquisas e desenvolvimento tecnológico de produtos e processos, e seus resultados são colocados no mercado (ABRITA et al., 2020).

Segundo Dosi (1982), o ambiente socioeconômico influencia a inovação ao fazer a seleção entre mutações, de forma darwinista, em confluência com um mercado que recompensa ou pune as inovações. Desta forma, as novas tecnologias são selecionadas através de uma interação complexa entre: os fatores econômicos fundamentais, a busca de novas oportunidades e importantes fatores institucionais.

A partir das leis, teorias e modelos revisitados ao longo deste trabalho, os estudos da trajetória e as modelagens desenvolvidas, tornou-se possível apresentar uma nova perspectiva a respeito da IBtS e suas possíveis consequências sobre os estoques minerais dos solos paraenses, com ênfase no Ferro solúvel. Este novo sentido posiciona a intensificação em um local mais simples de se entender; retirando a “varinha mágica” da expressão das proteínas exógenas, recolocando-a frente a frente com a materialidade do substrato utilizado em sua sintetização e situando-a enquanto o que de fato é; um método.

Em decorrência da concepção da IBtS enquanto método de exploração, a decomposição das modelagens desenvolvidas ao longo do Capítulo 4 trouxeram a possibilidade de se estipular um limite. Quando a eficiência no uso do recurso atinge o esgotamento deste, a validade da hipótese de Borlaug expira, explicando a necessidade de avanço sobre novas áreas agricultu̇ráveis.

Aqui, explana-se que há dois tipos de limite à validade da HB. O limite teórico da hipótese de Borlaug sempre será o esgotamento completo do solo. Já o limite prático, onde as teorias econômicas explicam o fenômeno através de forças de mercado e do Paradoxo de Jevons, figura um momento anterior à exaustão do recurso. Um solo em exploração, de onde não mais se extraia suficiente para que os desejados níveis de lucratividade se mantenham, é então abandonado. Se o resultado do método de exploração é esperado, antecipam-se as forças de mercado à demanda; com mais oferta de terra. A lógica deixa de ser paradoxal e passa a ser complementar.

Nesta perspectiva o mercado, ainda que apresente a IBtS como uma solução sustentável, é um agente ativo; tanto na mudança desta, quanto nas *respostas* aos efeitos dela, respondendo à mesma inovação tecnológica que anteriormente selecionou.

Assim, se a força de mercado ativa, que motiva o crescimento em área plantada não o faz de forma inesperada, antepõe-se então, a uma tendência que não é novidade. Foi prevista, identificada e cunhada com um pertinente termo já anteriormente mencionado, por Liebig (1868), há dois séculos. Raubwirtschaft.

Nesta Economia do Esgotamento moderna, a intensificação biotecnológica da Soja na exploração no recurso poderia ser entendida na categoria científica de método. Um método, que o mesmo mercado, que oferta mais terras, selecionou. Para melhor compreender a IBtS e seus caminhos no desenvolvimento do Pará, a perspectiva de análise da trajetória a partir das teorias de mudança da tecnológica precisa ser descomprimida do local econômico, interpondo a inovação biotecnológica como um tipo de dispositivo, para fins que compreendem uma estratégia.

Segundo Almeida e Marin (2010), as estratégias seguidas pelo agronegócio são nada menos que parte da pauta política mundial, inclusive das agências multilaterais, especialmente a partir de um discurso intimamente relacionado à crescente necessidade de abastecimento alimentar, e “compreendem um conjunto heterogêneo de discursos, de mecanismos jurídico-formais e de ações ditas empreendedoras” (ALMEIDA, 2010, p. 102). Desta forma, a monocultura da soja no Pará encaixa-se em um determinado ideário de desenvolvimento sustentável, pela importância de “aumentar significativamente as exportações dos países em desenvolvimento, em particular com o objetivo de duplicar a participação dos países menos desenvolvidos nas exportações globais até 2020” (ODS, 2023). Este Objetivo do Desenvolvimento Sustentável (ODS 17.11) foi estabelecido na Rio+20, em 2012. Na safra seguinte a este mesmo ano o Pará, que já entregava mais de 5 milhões de saca de soja ao superávit nacional, dobrou para 10 milhões de sacas sua produção, e depois 15 e 20, e assim quase sucessivamente até as 50 milhões de sacas, em 2023 (Gráfico 11). O Pará contribui com 25% do valor exportado pelo setor sojicultor do Brasil (FAEPA, 2023).

Segundo Delgado (2013, p. 64), a as agroestratégias (ainda) estão assentadas “[...] na captura e superexploração das vantagens comparativas naturais.

À luz da lógica da natureza e das Leis da matéria aqui revisitadas, o portfólio de defesa Bt comercialmente disponível no Brasil foi escrutinado em seus aspectos intrínsecos, com relação ao desenvolvimento da monocultura sobre os solos vermelhos do Pará. A IBtS, apesar de altamente custosa, encontraria então nas particularidades dos solos vermelhos paraenses, a vantagem natural comparativa necessária à continuidade de sua utilização, pelo menos por enquanto.

Quando a sustentabilidade econômica do setor sojeiro foi identificada como dependente de um crescimento vertiginoso de AP em razão da conjuntura Internacional (2019-2023), concluiu-se que a HB pode ser verdadeira *por um espaço de tempo* que, no caso da soja, é alheio às escolhas do produtor rural paraense. Em um cenário positivo, o momento poderia se estender em uma unidade de terra enquanto a eficiência em liquidar o recurso não atinja limites críticos de nutrientes no solo, cuja reposição comprometa a lucratividade.

Dada a importância para a monocultura da soja e teor frequente aos solos paraenses, as vantagens comparativas minerais exploradas através IBtS podem render, a depender do cenário, não menos que três centenas de safras de alta produtividade, liquidando em (g) gramas o micronutriente evidenciado nesta dissertação.

O Solo é o maior patrimônio do produtor, configurando-se com a base da produção vegetal, cuja qualidade depende das propriedades físicas, químicas e biológicas (MARTIN; PIRES; VEY, 2022).

Estre trabalho identificou um padrão de crescimento de Área Plantada conseguinte à liberação comercial de cada uma das três gerações biotecnológicas da Soja transgênica. Ainda, a influência de conjunturas externas dentro das escolhas aparece positivamente relacionada a situações em que aumentar a área plantada assegurara um balanço positivo.

Concluiu-se que a IBtS fora insuficiente para evitar, tanto que a pressão por commodities na pandemia (2020/2021) puxasse o crescimento em área plantada (Paradoxo de Jevons) sobremaneira, como que evitasse efeito semelhante ocasionado pelo aumento dos gastos fertilizantes nitrogenados, em razão da conjuntura russa. Considera-se a possibilidade de que a biotecnologia seja entendida como uma segurança no investimento, inclusive para que se continue avançando no estado.

É possível que tal “sensação de segurança” encontre lastro em uma certa garantia de geração e acúmulo de renda no presente, e não na continuidade da atividade agrária. Na verdade, este modelo de exploração dos estoques de ferro orgânico inorgânico de rápida biodisponibilização (Fe3+), a longo prazo, não é interessante nem para os produtores da commodity em razão de (1) o alto custo atual de reposição e (2) até então, o desconhecimento do valor real que sai do ativo terra para a produção da comodity. Não obstante, o desconhecimento compromete a negociação do preço final da saca do mercado internacional. Todavia, como visto, o aumento do preço da saca influencia o crescimento da cultura na direção inclusive de terras destinadas à conservação, especialmente as domínio estatal (AZEVEDO-RAMOS et al., 2020). Isto pois, parecem-me convincentes as percepções de Angelsen & Kaimowitz (2001), ao notarem a racionalidade que guia a hipótese de Borlaug em escala regional, razoável apenas nos casos de cultivo orientado para subsistência, quando o agricultor entende o seu tempo de trabalho como o recurso mais escasso, e tende a parar de expandir o cultivo assim que tiver suas necessidades atendidas (ANGELSEN; KAIMOWITZ, 2001). No caso da agricultura industrial, que conta com a contratação de mão de obra e tecnificação (IBtS) do manejo favorecendo a produtividade, ampliando as possibilidades de comercialização e de acúmulo de excedentes econômicos (ANGELSEN et al., 2001; IGARI; TAMBOSI, 2016), o aumento global do preço da saca implica em um incentivo ainda maior para a conversão de novas áreas. Em outra situação hipotética, seria possível posicionar a commodity dentro de um projeto de desenvolvimento que dialogue com mercados compradores sobre o valor real do produto e, que atue para regular a exportação redistribuindo o crescimento decorrente da exploração mineral. Desta forma, a contribuição para o desenvolvimento regional deve regular a expansão puxada pelo alto valor agregado, atrelado ao entendimento da importância mineral da comodity, no âmbito das cadeias globais de abastecimento alimentar.

O Brasil continua a ignorar a riqueza e o potencial bioeconômico de seus biomas originários, aceitando a supressão de florestas em função da exploração mineral do solo. A inexistência de um sistema oficial de rastreabilidade da soja no Estado do Para é sintomática de um modelo de crescimento dado, desenhado e implementado já há algumas décadas. Este modelo foi responsável por tornar o brasil o maior exportador de soja do mundo, atingindo o ponto 17.11 dos Objetivos do

Desenvolvimento Sustentável. Ainda é possível explorar os estoques naturais a partir de terras que estão sob a propriedade pública. Terras de propriedade pública tem, por princípio, direito de uso comum e, através deste argumento têm-se avançado em terras sem-dono (AZEVEDO-RAMOS et al., 2020). Neste sentido, ferramentas estatais podem auxiliar o retorno dessa exploração para o direito coletivo; a exemplo da renda mineral, regulada pela Compensação Financeira pela Exploração Mineral (CFEM) que têm conseguido impactar o desenvolvimento de municípios-polos metalúrgicos. Sabe-se que em Parauapebas e Canaã dos Carajás existem melhores indicadores de saneamento do que o restante dos municípios paraenses, em função dos royalties minerais (DOS SANTOS CAITANO; MORALES, 2022).

É de fundamental importância avaliar a fisiologia da cultura geneticamente editada em seus aspectos hiper acumuladores e de “absorção de luxo” (COSMO et al., 2023), sob o risco de, através de estratégias para o desenvolvimento econômico desenhadas para a commodity, promover uma escalada do esgotamento.

Por fim, no âmbito da pesquisa científica brasileira, é preciso tomar para si a responsabilidade e o reconhecimento da necessidade da pesquisa interdisciplinar. Sanar o problema de comunicação entre uma área do conhecimento, e outra, pode perpassar por uma terceira. É preciso que os profissionais da fisiologia vegetal estejam atentos às expressões das edições gênicas propostas pela indústria biotecnológica aos técnicos agrícolas, que dialogam com a prática em campo. Se *n* edições aumentam a produtividade em razão de *n* expressões gênicas, não há mágica; há sempre uma matemática fisiológica a explicar. Ainda, é preciso subsídio para a resolução da questão sobre correspondências minerais (nM) relativas à expressão de proteínas transgênicas.

Repensar o argumento legitimador da exploração agrícola, a ideia de que a terra não tem valor até que haja um investimento inicial, para se tornar fértil, pode ser o primeiro passo para entendê-la para além do conceito de commodity. Não obstante ignorar que, para as espécies economicamente importantes ali presentes (e.g. Açaí, Bacuri, Cupuaçu, Castanha, Guaraná etc.) desde antes do advento da agricultura a fertilidade era *perfeita*, este argumento ignora também a possibilidade de que um solo amazônida possa nunca mais ser originariamente fértil, após a exploração da "fertilidade construída" para a monocultura. A biotecnologia que busca adaptar qualquer coisa a qualquer lugar e ignora a cíclica do retorno de tudo às suas condições

originais, ou ao mais próximo possível para continuidade da exploração, nunca poderá se afirmar sustentável. A longo prazo, nem economicamente.

REFERÊNCIAS

ABDEL-BANAT, B.M.A.; El-SHAFIE, H.A.F. Genomics Approaches for insect control and insecticide resistance development in date palm. In: AL-KHAYRI, J.M.; JAIN, S.M.; JOHNSON, D.V. (eds.). **The date palm genome,v. 2**. Compendium of plant genomes. Cham: Springer, 2021. p. 215-248. DOI: 10.1007/978-3-030-73750-4_11. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-030-73750-4_11. Acesso em: 7 mai. 2024.

ABRITA, M. B.; VIGNANDI, R. S.;FALLEIRO, M.P.S. Dimensão territorial e inovação: uma aproximação entre economia e geografia. **Caminhos de Geografia**, v. 21, n. 73, p. 243–252, 2020. DOI: 10.14393/RCG217349081. Disponível em: https://doi.org/10.14393/RCG217349081. Acesso em: 1 mai. 2024.

AGÊNCIA DE DEFESA AGROPECUÁRIA DO ESTADO DO PARÁ – ADEPARÁ; BARRETO, I. A Adepará está com novo sistema, o SIGEAGRO. Confira o passo a passo para acessá-lo. [Site]. Adepará, 07 nov. 2023. Disponível em: https://www.adepara.pa.gov.br/videos/adepar%C3%A1-esta-com-novo-sistema-o-sigeagro-confira-o-passo-passo-para-acessar-lo. Acesso em: 22 fev. 2024.

AGÊNCIA PARÁ. CARDOSO, R. [Site]. Adepará alerta para período de cadastro anual de plantio de soja no Pará. Disponível em: https://www.agenciapara.com.br/noticia/50584/adepara-alerta-para-periodo-de-cadastro-anual-de-plantio-de-soja-no-para

ALBERGONI, L.; PELAEZ, V. Da Revolução Verde à agrobiotecnologia: ruptura ou continuidade de paradigmas? **Revista de Economia**, Editora UFPR, v. 33, n. 1, p.31-53, jan.-jun. 2007. DOI: 10.5380/re.v33i1.8546. Disponível em: http://dx.doi.org/10.5380/re.v33i1.8546. Acesso em: 1 mai. 2024.

ALBRECHT, L. P. **Filosofia da agronomia:** elementos epistemológicos e tradições de pesquisa. 2024. 203 f. Tese (Doutorado em Filosofia) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2024. Disponível em: https://tede.unioeste.br/handle/tede/7237. Acesso em: 7 jul. 2024.

ALCOTT, B.; GIAMPIETRO, M.; MAYUMI, K. *et al*. **The Jevons paradox and the myth of resource efficiency improvements**, London: Routledge, 2012. DOI: 10.4324/9781849773102. Disponível em: https://doi.org/10.4324/9781849773102. Acesso em: 19 mai. 2024.

ALEXANDER, P.; ARNETH, A.; HENRY, R. *et al*. High energy and fertilizer prices are more damaging than food export curtailment from Ukraine and Russia for food prices, health and the environment. **Nature Food.** v. 4, p. 84–95, 2022. DOI:

10.1038/s43016-022-00659-9. Disponível em: https://doi.org/10.1038/s43016-022-00659-9. Acesso em: 12 jun. 2024.

ALMEIDA, A. W. B. Agro estratégias e desterritorialização- direitos territoriais e étnicos na mira dos estrategistas dos agronegócios. *In*: ALMEIDA, A.W.; ZHOURI, A.; LORIS, A. A. R. *et al.* **Capitalismo globalizado e recursos territoriais** – fronteiras da acumulação no Brasil contemporâneo. Rio de Janeiro: Editora Lamparina, 2010.

ALMEIDA, A. W. B.; MARIN, R. A. Campanhas de desterritorialização na Amazônia: o agronegócio e a reestruturação do mercado de terras. *In*: BOLLE, W.; CASTRO, E.; VEJMELKA, M. (orgs.). **Amazônia**: região universal e teatro do mundo. São Paulo: Globo, 2010.

ALTIERI, A. Ecological Impacts of Transgenic Crops on Agroecosystem Health. **Ecosystem Health** 6, no. 1, 13-23, 2000. ISSN: 1076-2825.

AMEND, J. P.; SHOCK, E. L. Energetics of amino acid synthesis in hydrothermal ecosystems. **Science**, v. 281, n. 5383, p.1659–1662, sep.1998. DOI: 10.1126/science.281.5383.1659. Disponível em: https://doi.org/10.1126/science.281.5383.1659. Acesso em: 3 jul. 2024.

ANGELSEN, A.; KAIMOWITZ, D. Agricultural technologies and tropical deforestation. **Agricultural technologies and tropical deforestation**. Cabi Digital Library, 2001. DOI: 10.1079/9780851994512.0001. Disponível em: https://doi.org/10.1079/9780851994512.0001. Acesso em: 6 mai. 2024.

ARAÚJO, R. A. Amazônia brasileira: um estudo do agronegócio da soja no pará no período de 2008 a 2018. **Revista Educação Ambiental em Ação**.v. 23, n.78, 2021. Disponível em: http://revistaea.org/artigo.php?idartigo=4063. Acesso em: 20 mai. 2022.

ARAÚJO, R. C. Análise sobre a monocultura de soja e o desenvolvimento sustentável na Amazônia com base na teoria do desenvolvimento endógeno**.** **Revista Economia e Desenvolvimento**, v. 26, n. 1, p. 105–118, 2014. DOI: 10.5902/1414650913882. Disponível em: https://doi.org/10.5902/1414650913882. Acesso em: 20 mai. 2022.

ARORA, Rajani. **Metamorphosis**. Developmental Biology. Swami Shradhanand College, University of Delhi, Delhi, 110036. 2009.

ASKEW, G. P.; MOFFATT, D. J.; MONTGOMERY, R. F. *et al*. Soil landscapes in north eastern Mato Grosso [Brazil]. **The Geographical Journal**, v.136, n. 2, p.211, 1970. DOI: 10.2307/1796280. Disponível em: https://doi.org/10.2307/1796280. Acesso em: 21 jun. 2024.

ASSUNÇÃO, J.; BRAGANÇA, A. **Technological change and deforestation**: evidence from the Brazilian Soybean revolution. Working Paper. Climate Policy Initiative, aug. 2015. Disponível em: https://www.climatepolicyinitiative.org/wp-

content/uploads/2021/01/Technological_Change_and_Deforestation_Working_Paper_CPI.pdf. Acesso em: 22 fev. 2024.

ATKINS, P. W.; JONES, L. **Princípios de Química**: questionando a vida moderna e o meio ambiente. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

AYRES, R. U. Sustainability economics: Where do we stand? **Ecological Economics**, v. 67, n. 2, p. 281–310, sep. 2008. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2007. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.12.009. Acesso em: 9 jul. 2024.

AYRES, Robert U.; BERGH, J. C.; GOWDY, J. M. Strong versus weak sustainability: economics, natural sciences, and “consilience”. **Environmental Ethics**, v. 23, n. 2, p. 155–168, 2001. DOI: 10.5840/enviroethics200123225. Disponível em: https://doi.org/10.5840/enviroethics200123225.12.009. Acesso em: 9 jul. 2024.

AZEVEDO-RAMOS, C. et al. Lawless land in no man’s land: The undesignated public forests in the Brazilian Amazon. **Land Use Policy**, v. 99, p. 104863, 1 dez. 2020. DOI: doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104863

BALDWIN, I. T. Jasmonate-induced responses are costly but benefit plants under attack in native populations. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 95, n. 14, p. 8113–8118, jul.1998. DOI: 10.1073/pnas.95.14.8113. Disponível em: https://doi.org/10.1073/pnas.95.14.8113. Acesso em: 8 mai. 2024.

BARCELLOS, V. Sete novas cidades de Mato Grosso. **Paisagem e Ambiente**, n. 34, p. 61–80, 7 dez. 2014. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/paam/article/view/97119>. Acesso em: 3 jul. 2024.

BARTEK, T.; BLOMBACH, B.; ZÖNNCHEN, E. *et al*. Importance of NADPH supply for improved L-valine formation in Corynebacterium glutamicum. **Biotechnology Progress**, v. 26, n. 2, p. 361–371, 2010. DOI: 10.1002/btpr.345. Disponível em: https://doi.org/10.1002/btpr.345. Acesso em: 23 mai. 2024.

BARTON, K. A.; WHITELEY, H. R.; YANG, Ning-Sun. Bacillus thuringiensis §-Endotoxin expressed in transgenic nicotiana tabacum provides resistance to lepidopteran insects. **Plant Physiology**, v. 85, n. 4, p. 1103–1109, dec. 1987. DOI: 10.1104/pp.85.4.1103. Disponível em: https://dx.doi.org/10.1104/pp.85.4.1103. Acesso em: 9 jul. 2024.

BENBROOK, C. M. Impacts of genetically engineered crops on pesticide use in the U.S.-the first sixteen years. **Environmental Sciences Europe**, v. 24, 2012. DOI: 10.1186/2190-4715-24-24. Disponível em: https://doi.org/10.1186/2190-4715-24-24. Acesso em: 1 mai. 2024.

BENDER, R. R.; HAEGELE, J. W.; BELOW, F. E. Nutrient uptake, partitioning, and remobilization in modern soybean varieties. **Agronomy Journal**, v. 107, n. 2, p. 563–573, 2015. DOI: 10.2134/agronj14.0435. Disponível em: https://doi.org/10.2134/agronj14.0435. Acesso em: 9 jul. 2024.

BENDER, R. R.; HAEGELE, J. W.; RUFFO, M. L. *et al*. Nutrient uptake, partitioning, and remobilization in modern, transgenic insect-protected maize hybrids. **Agronomy Journal**, v. 105, n. 1, p. 161–170, 2013. DOI: 10.2134/agronj2012.0352. Disponível em: https://doi.org/10.2134/agronj2012.0352. Acesso em: 9 jul. 2024.

BISSOLI, L. **A Trajetória de um Problema Público**: A atuação do Ministério Público no caso dos Transgênicos. 2022. 204 f. Tese (Doutorado em Ciência Política) – Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2022. Disponível em: https://www.ifch.unicamp.br/ifch/trajetoria-problema-publico-atuacao-ministerio-publico-caso-transgenicos. Acesso em: 7 jul. 2024.

BLOMSTROM, D. C.; KNIGHT, E.; PHILLIPS, W. D.; WEIHER, J. F. The Nature Of Iron In Ferredoxin**. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 51, n. 6, p. 1085–1092, 1964.

BONATO, E. R; LANGE, C. E.; BERTAGNOLLI, P. F. Desempenho de cultivares de soja de diferentes ciclos em semeaduras de dezembro, na região do Planalto médio do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v.31, n.6, p.935-940, 2001. DOI: 10.1590/S0103-84782001000600002. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0103-84782001000600002. Acesso em: 9 jul. 2024.

BORLAUG, N. E. Mankind and civilization at another crossroad: In balance with Nature - A biological myth. **BioScience** 1972, 22, 41–44. DOI: https://doi.org/10.2307/1296186

BORLAUG, N. E. Feeding a world of 10 billion people: the miracle ahead. **In Vitro Cellular and Developmental Biology - Plant**, v. 38, n. 2, p. 221–228, 2002. DOI: 10.1079/IVP2001279. Disponível em: https://doi.org/10.1079/IVP2001279. Acesso em: 12 mai. 2024.

BORLAUG, N. E. Mankind and civilization at another crossroad: in balance with nature - a biological myth. **BioScience**, v. 22, n. 1, p. 41–44, jan.1972. DOI: 10.2307/1296186. Disponível em: https://doi.org/10.2307/1296186. Acesso em: 12 mai. 2024.

BOURGAUD, F. et al. Production of plant secondary metabolites: a historical perspective. **Plant Science**, v. 161, n. 5, p. 839–851, 1 out. 2001. Acesso em: 1 jul. 2024.

BOY, J.; STREY, S.; SCHÖNENBERG, R. *et al*. Seeing the forest not for the carbon: why concentrating on land-use-induced carbon stock changes of soils in Brazil can be climate-unfriendly. **Regional Environmental Change**, v. 18, n. 1, p. 63–75, 2018. DOI: 10.1007/s10113-016-1008-1. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s10113-016-1008-1. Acesso em: 12 mai. 2024.

BROOKES, G.; BARFOOT, P. Global income and production impacts of using GM crop technology 1996-2013. **GM Crops & Food**, v. 6, n. 1, p. 13–46, 2015. DOI: 10.1080/21645698.2015.1022310. Disponível em: https://doi.org/10.1080/21645698.2015.1022310. Acesso em: 5 mai. 2024.

BROOKES, G.; BARFOOT, P. GM crops: global socio-economic and environmental impacts 1996-2018. **PG Economics Ltd, UK**, Jun 2020. Disponível em: https://www.agrobio.org/sites/default/files/2021-10/globalimpactfinalreportJuly2020.pdf. Acesso em: 1 mai. 2024.

BROWN, T. L.; LEMAY, H. E.; BURSTEN, B. E.; BURDGE, J. R**. Química**: a ciência central. 9. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005.

BROWNE, C. A. Liebig and the law of the minimum. *In*: MOULTON. F. R. **Liebig and after liebig**. American Association for the Advancement of Science, 1942.

BUENO, A. F.; PANIZZI, A. R.; HUNT, T. E. Challenges for Adoption of Integrated Pest Management (IPM): the Soybean Example. **Neotropical Entomology**, v. 50, p. 5–20, 2021. DOI: 10.1007/s13744-020-00792-9. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s13744-020-00792-9. Acesso em: 1 mai. 2024.

CAETANO BACHA, C. J.; STEGE, A. L.; HARBS, R. Ciclos de preços de terras agrícolas no Brasil. **Revista de Política Agrícola**, v. 25, n. 4, p. 18–37, 2016. Disponível em: <https://seer.sede.embrapa.br/index.php/RPA/article/view/1201>. Acesso em: 11 set. 2024.

CAMPOS, F. R. **Controvérsia, política e risco:** enquadrando os transgênicos nos portais Estadão Digital e Folha de S. Paulo. 2017. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017. DOI: 10.11606/D.100.2019.tde-02032018-165034. Disponível em: https://doi.org/10.11606/D.100.2019.tde-02032018-165034. Acesso em: 25 jun. 2024.

CARVALHO, T. S. **Uso do solo e desmatamento nas regiões da Amazônia Legal Brasileira**: condicionantes econômicos e impactos de políticas públicas. 2014. 200 f. Tese (Doutorado em Economia). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/AMSA-9K9HGJ>. Acesso em: 30 jul. 2024.

CASTLE, L. A.; WU, G.; MCELROY, D. Agricultural input traits: past, present and future. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 17, n. 2, p. 105–112, 2006. DOI: 10.1016/j.copbio.2006.01.011. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.copbio.2006.01.011. Acesso em: 10 jul. 2024.

CASTRO, B. S. A Comissão Técnica Nacional de Biossegurança (CTNBio): palco de crises entre leigos e peritos. *In*: XXVIII CONGRESSO INTERNACIONAL DA ASSOCIAÇÃO LATINO-AMERICANA DE SOCIOLOGIA - ALAS, 9., 2011, Recife, **Anais**. Recife: UFPE, 2011.

CELLARD, A. A análise documental. *In:* POUPART, J**. A pesquisa qualitativa: enfoques epistemológicos e metodológicos**. 2012. pp. 295-316. Vozes.

CENTRO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA – CEPEA. **INDICADOR DA SOJA CEPEA/ESALQ – PARANÁ. Série de Preços.** 2023. Disponível em: https://www.cepea.esalq.usp.br/br/indicador/soja.aspx. Acesso em: 9 jul. 2023.

CHICHILNISKY, G. An axiomatic approach to sustainable development. **Social Choice and Welfare**, v. 13, n. 2, p. 231–257, 1996. DOI: 10.1007/BF00183353. Disponível em: https://doi.org/10.1007/BF00183353. Acesso em: 9 jul. 2024.

COELHO, A. S.; GRECA, R. A. Transgênicos: aspectos do desenvolvimento no Brasil. **Cadernos da Escola de Negócios**, v. 1, n. 3, 2005. Disponível em: https://portaldeperiodicos.unibrasil.com.br/index.php/cadernosnegocios/article/view/2148/1722. Acesso em: 9 jul. 2024.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Evolução dos custos de produção de soja no Brasil**. Compêndio de estudos Conab V.2, 2016. Disponível em: https://www.conab.gov.br/institucional/publicacoes/compendio-de-estudos-da-conab/item/download/2512_c2638f76696e3b926ab22e93f9549d21. Aceso em 02 fev. 2022.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Séries históricas-Soja**. 2023. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras/itemlist/category/911-soja. Acesso em: 9 jul. 2023.

COSMO, B. N.; ROSA, W. B.; DANILUSSI, T. M. Y. *et al*. Demanda nutricional da cultura da soja no Paraná. **Revista de Agronomia Brasileira**, v. 7, 2023. DOI: 10.29372/rab202348. Disponível em: http://dx.doi.org/10.29372/rab202348. Acesso em: 9 jul. 2024.

COSTA, F. A. Intensificação da agropecuária aumenta ao invés de reduzir a pressão sobre a floresta amazônica: paradoxo de Jevons impera nos casos da soja e do gado no Brasil (2001-2021). **Centro de Pesquisa em Macroeconomia das Desigualdades FEA/USP**. Working Paper, n. 20, dez. 2023. Disponível em: https://madeusp.com.br/wp-content/uploads/2023/11/WP-20_site.pdf. Acesso em: 10 jul. 2024.

COSTA, F. A. Notas sobre uma economia importante, (super) verde e (ancestralmente) inclusiva na Amazônia. *In*: AZEVEDO, A. A.; CAMPANILI, M.; PEREIRA, C. (orgs.). **Caminhos para uma agricultura familiar sob bases ecológicas**: produzindo com baixa emissão de carbono. Brasília, DF: IPAM, 2015. cap. 3, p. 53-96. Disponível em: https://ipam.org.br/wp-content/uploads/2016/01/Livro-Agricultura-Familiar-Baixo-Carbono_superbaixo.pdf. Acesso em: 10 jul. 2024.

COSTA, L. A. N.; ROCHA, R. Não basta ser “tech”: o choque de produtividade da soja transgênica no desmatamento e usos do solo no Brasil. *In*: **PRÊMIO BNDES PELO CLIMA**. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2022. Disponível em: http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/22624. p. [5]-64. Acesso em: 16 mai. 2024.

CRICHTON, R. The importance of iron for biological systems. *In*: CRICHTON, R. **Iron Metabolism**, John Wiley & Sons, Ltda. p.17–58, 2009. DOI: 10.1002/9780470010303. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470010303. Acesso em: 2 jul. 2024.

CRUZ, S. L. **A soja (Glycine max L. Merril) e seus impactos sócio-ambientais na região oeste do Pará (municípios de Santarém e Belterra)**. 2008. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Gestão Hídrica e Ambiental) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2008. Disponível em: https://bdm.ufpa.br/jspui/handle/prefix/2446. Acesso em: 10 jul. 2024.

CZAPEK, F. **Biochemie der Pflänzen** 2. Aufl. Jena: G. Fischer, 1921.Disponível em: https://www.biodiversitylibrary.org/bibliography/37818. Acesso em: 9 jul. 2024.

DALL'AGNOL, A. A soja no Brasil: evolução, causas, impactos e perspectivas. **Anais Mercosoja** - Quinto Congresso de la Soja del Mercosur. Rosário, 2011. Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/47515/1/amelio.soja.2011.pdf

DAME, Z. T.; RAHMAN, M.; ISLAM, T. Bacilli as sources of agrobiotechnology: recent advances and future directions. **Green Chemistry Letters and Reviews**, v. 14, n. 2, p. 245–270, 2021. DOI: 10.1080/17518253.2021.1905080. Disponível em: https://doi.org/10.1080/17518253.2021.1905080. Acesso em: 2 mai. 2024.

DAR, S. A.; KASHMIR, J.A.; AMIR, I. *et al.* Genetic engineering and insect resistance. **Journal of Entomology and Zoology Studies**, v. 5, n. 3, p. 1175-1184. 2017. Disponível em: https://www.entomoljournal.com/archives/2017/vol5issue3/PartQ/5-3-150-567.pdf. Acesso em: 2 mai. 2024.

DAROIT, D. **A controvérsia da soja transgênica no Rio Grande do Sul no período de 1998 a 2003**. 2007. Tese (Doutorado em Administração). - Escola de Administração, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2007. Disponível em: http://hdl.handle.net/10183/17084. Acesso em: 15 mai. 2024.

DE COSA, B.; MOAR, W.; LEE, S. B. et al. Overexpression of the Bt cry2Aa2 operon in chloroplasts leads to formation of insecticidal crystals. **Nature Biotechnology**, 19:71–74, 2001. doi: 10.1038/83559

DELGADO, G. Economia do agronegócio (anos 2000) como pacto do poder com os donos da terra. **Revista Reforma Agrária**, edição especial, p. 61-68, jul.2013. Disponível em: https://agroecologia.org.br/wp-content/uploads/2013/10/revista-abra-agronegocio-e-realidade-agraria-no-brasil.pdf. Acesso em: 2 mai. 2024.

DEWICK, P. M. The biosynthesis of C5-C25 terpenoid compounds. **Nature Production Reports**. Vol. 19. 181–222, 2002. DOI: doi.org/10.1039/B002685I

DOS SANTOS CAITANO, T. B.; MORALES, G. P. Potencial Dos Royalties Minerais Na Promoção Do Desenvolvimento Socioeconômico de Municípios do Estado do Pará, Brasil. **Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional**, v. 18, n. 3, p. 89–103, 16 nov. 2022. Disponível em: <https://www.rbgdr.com.br/revista/index.php/rbgdr/article/view/5861>. Acesso em: 4 ago. 2024.

DOSI, G. Technological paradigms and technological trajectories: a suggested interpretation of the determinants and directions of technical change. **Revista Brasileira de Inovações**, v. 11, n. 3, p. 147-162, 1982. DOI: 10.1016/0048-7333(82)90016-6. Disponível em: https://doi.org/10.1016/0048-7333(82)90016-6. Acesso em: 2 mai. 2024.

DOSI, G.; NELSON, R. R. Technological paradigms and technological trajectories. *In*: AUGIER, M.; TEECE, D. (eds.). **The Palgrave encyclopedia of strategic management**. London: Palgrave Macmillan, 2016. p. 1–12. DOI: 10.1057/978-1-349-94848-2_733-1. Disponível em: https://doi.org/10.1057/978-1-349-94848-2_733-1. Acesso em: 1 mai. 2024.

DOVERS, S. R.; HANDMER, J. W. Uncertainty, sustainability and change. **Global Environmental Change**, v. 2, n. 4, p. 262–276, dec. 1992. DOI: 10.1016/0959-3780(92)90044-8. Disponível em: https://doi.org/10.1016/0959-3780(92)90044-8. Acesso em: 9 jul. 2024.

DUFOURMANTEL, N. et al. Generation of fertile transplastomic soybean. **Plant Molecular Biology**, 55(4):479.-89, 2004. doi: 10.1007/s11103-004-0192-4.

DURAIMURUGAN, P.; DEVI, P.S.V. Assessment of Bacillus thuringiensis var. kurstaki (Bt-127) SC formulation as a component of IPM in soybean through farmer's participatory approach. **Journal of Oilseeds Research**, India, v. 38, n. 4, 2021. Disponível em: https://epubs.icar.org.in/index.php/JOR/article/view/137215. Acesso em: 11 jul. 2024.

ELKINGTON, J. Canibais com garfo e faca. São Paulo: Makron Books, 2001.

ELKINGTON, J. Towards the sustainable corporation: Win-Win-Win Business. Strategies for sustainable development. **California Management Review**, v. 36, n. 2, p. 90–100, 1994. DOI: 10.2307/41165746. Disponível em: https://doi.org/10.2307/41165746. Acesso em: 9 jul. 2024.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Soja - BRS 1003IPRO**. 2023. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-solucoes-tecnologicas/-/produto-servico/10144/soja---brs-1003ipro. Acesso em: 9 jul. 2023.

ENSIKAT, H. J.; WESSELY, H.; ENGESER, M. *et al*. Distribution, ecology, chemistry and toxicology of plant stinging hairs. **Toxins**, v.13, n.2, p.141, 2021. DOI: 10.3390/toxins13020141. Disponível em: https://doi.org/10.3390/toxins13020141. Acesso em: 1 jul. 2024.

EPSTEIN, E**. Mineral nutrition of plants**: principles and perspectives. John Wiley & Sons, Inc. Nova Iorque. 412 p. 1972.

Federação da Agricultura e Pecuária do Pará – FAEPA. **Agronegócio Paraense**. 2023. Disponível em: https://sistemafaepa.com.br/faepa/agronegocio-paraense/. Acesso em: 8 jul. 2024

FERNANDES, A. R.; SOUZA, E. S.; BRAZ, A. M. B.; Quality reference values and background concentrations of potentially toxic elements in soils from the Eastern

Amazon, Brazil. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 190, p. 453–463, jul. 2018. DOI: 10.1016/j.gexplo.2018.04.012. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2018.04.012. Acesso em: 14 abr. 2024.

FERNANDES, R. F. Constante de avogadro. **Revista de Ciência Elementar**, v. 3, n. 3, 2015. DOI: 10.24927/rce2015.191. Disponível em: http://doi.org/10.24927/rce2015.191. Acesso em: 8 jul. 2024.

FERNANDES, T.; HACON, S. S.; NOVAIS, J. W. Z. Variability of rainfall and its relation to the sustainable development objectives in populations exposed to water changes in the southeastern amazon region of pará. **Revista Brasileira de Geografia Fisica**, v. 13, n. 4, p. 1519–1536, 2020. DOI: 10.26848/rbgf.v13.4.p1519-1536. Disponível em: https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.4.p1519-1536. Acesso em: 21 jun. 2024.

FERREIRA, R. L. F. et al. Bioavailability of soil Cu, Fe, Mn and Zn from soil fractions. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 42, n. 1, p. 19–42, 19 jan. 2021. Disponível em: https://www.ojs.uel.br/revistas/uel/index.php/semagrarias/article/view/37931. Acesso em: 14 abr. 2024.

FIORINO, D. J. Explaining national environmental performance: Approaches, evidence, and implications. **Policy Sciences**, v. 44, n. 4, p. 367–389, 2011. DOI: 10.1007/s11077-011-9140-8. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s11077-011-9140-8. Acesso em: 9 jul. 2024.

FOLHES, R. T.; FERNANDES, D. A. A dominância do paradigma tecnológico mecânico-químico-genético nas políticas para o desenvolvimento da bioeconomia na Amazônia (Paper 540). **Papers do NAEA**, v. 1, n. 1, 2022. DOI: 10.18542/papersnaea.v31i1.12993. Disponível em: Disponível em: http://dx.doi.org/10.18542/papersnaea.v31i1.12993. Acesso em: 7 jul. 2024.

FOSTER, J. B. **Marx's Ecology**: Materialism and Nature. Monthly Review**.** Nova Iorque, 2000.

FOSTER, J. B.; CLARK, B. The robbery of nature: capitalism and the metabolic rift. **Monthly Review**, v. 70, n. 3, p. 1–20, 2018. DOI: 10.14452/MR-070-03-2018-07_1. Disponível em: https://doi.org/10.14452/MR-070-03-2018-07_1. Acesso em: 3 mai. 2024.

FOSTER, J. B. **The Dialectics of Ecology**. Monthly Review Press, Nova Iorque. 2024.

FRAAS, C. Die Natur der Landwirtschaft. V. 1. Munique: **Cotta’sche**, 1857. Disponível em: https://play.google.com/store/books/details?id=sZVWAAAAcAAJ&pli=1. Acesso em: 21 jun. 2024.

FREITAS, L. B. N. **Análise molecular da adaptação de insetos herbívoros aos cardenolídeos de Calotropis procera**: Aspectos bioquímicos e ecológicos.

Dissertação (Mestrado em Bioquímica). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

FREITAS, L. B. N. **Análise molecular da adaptação de insetos herbívoros aos cardenolídeos de Calotropis procera**: Aspectos bioquímicos e ecológicos. Dissertação (Mestrado em Bioquímica). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

GAMA, J. R. N.; VALENTE, M. A.; OLIVEIRA JUNIOR, R. C. *et al*. Solos do estado do Pará. *In*: BRASIL, E. C.; CRAVO, M. S.; VIEGAS, I. J. M. (ed.). **Recomendações de calagem e adubação para o estado do Pará.** 2.ed. rev. atual. Brasília, DF: Embrapa, 2020. Pt. 1, cap. 1, p. 25-46. Disponível em: http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1127233. Acesso em: 21 jun. 2024.

GARCIA, D. S.; SOARES, J. T.; SILVA, M.G.B. “A morte pede passagem”: uma análise do princípio da precaução, das dimensões da sustentabilidade e a relação com os organismos geneticamente modificados. **Jurídicas**, v.16, n. 2, p. 74, 2019. doi: 10.17151/jurid.2019.16.2.6. Disponível em: http://dx.doi.org/10.17151/jurid.2019.16.2.6. Acesso em: 9 jul. 2024.

GARCIA, G.; CARDOSO, A. A.; SANTOS, O. A. M. Da escassez ao estresse do planeta: um século de mudanças no ciclo do nitrogênio. **Química Nova**, v. 36, n. 9, p. 1468–1476, 2013. DOI: 10.1590/S0100-40422013000900032. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0100-40422013000900032. Acesso em: 6 mai. 2024.

GARCÍA, M.; GARCÍA-BENÍTEZ, C.; ORTEGO, F.; FARINÓS, G. Monitoring Insect Resistance to Bt Maize in the European Union: Update, Challenges, and Future Prospects. **Journal of Economic Entomology**, 116 (2), 2023. doi: 10.1093/jee/toac154

GARCIA, R. A.; RICHETTI, A. **Comparação técnico-econômica entre soja convencional e intacta (IPRO) em Mato Grosso do Sul**. Dourados, MS: Embrapa Agropecuária Oeste, mar. 2018. (Comunicado Técnico, 233). Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1089207/comparacao-tecnico-economica-entre-soja-convencional-e-intacta-ipro-em-mato-grosso-do-sul. Acesso em: 7 jul. 2024.

GARLAND, S.; CURRY, H. A. Turning promise into practice: Crop biotechnology for increasing genetic diversity and climate resilience. **PLoS Biology**, v. 20, n. 7, e3001716, jul. 2022. DOI: 10.1371/journal.pbio.3001716. Disponível em: https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3001716. Acesso em: 1 mai. 2024.

GARNER, W. H.; GARNER, M. H.; SPECTOR, A. Comparison of the 10 000 and 43 000 dalton polypeptide populations isolated from the water soluble and insoluble fractions of human cataractous lenses. **Experimental Eye Research**, v. 29, n. 3, p. 257–276, sep.1979. DOI: 10.1016/0014-4835(79)90006-X. Disponível em: https://doi.org/10.1016/0014-4835(79)90006-X. Acesso em: 8 jul. 2024.

GAZIT, E.; SHAI, Y. Structural and functional characterization of the alpha 5-segment of Bacillus thuringiensis delta-endotoxin. **Biochemistry**, 32(13), 3429–3436, 1993. DOI:10.1021/bi00064a029

GILDING, E.K.; JAMI, S.; DEUIS, J.R. *et al*. Neurotoxic peptides from the venom of the giant Australian stinging tree. **Science Advances**, v. 6, n. 38, p. 8828–8844, sep. 2020. DOI:10.1126/sciadv.abb8828. Disponível em: https://doi.org/10.1126/sciadv.abb8828. Acesso em: 1 jul. 2024.

GODOY, D. N. et al. Managing Spodoptera Species (Lepidoptera: Noctuidae) Found in Brazilian Soybean Fields with Bt Soybean and Insecticides. **Agronomy**, v. 12, n. 11, 1 nov. 2022. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/365491243_Managing_Spodoptera_Species_Lepidoptera_Noctuidae_Found_in_Brazilian_Soybean_Fields_with_Bt_Soybean_and_Insecticides>. Acesso em: 28 jun. 2024.

GRITZNER, G. Gibbs free energies of transfer (ΔG◦tr) for alkali metal ions and tl+. **Inorganica Chimica Acta**, v. 24, n. C, p. 5–12, 1977. DOI: 10.1016/S0020-1693(00)93843-X. Disponível em: https://doi.org/10.1016/S0020-1693(00)93843-X. Acesso em: 8 jul. 2024.

GRYSPEIRT, A.; GRÉGOIRE, J. C. Effectiveness of the High Dose/Refuge Strategy for Managing Pest Resistance to Bacillus thuringiensis (Bt) Plants Expressing One or Two Toxins. **Toxins**, 4, 810-835, 2012. doi: 10.3390/toxins4100810

TWAIJ, B. M.; HASAN, M. N. Bioactive Secondary Metabolites from Plant Sources: Types, Synthesis, and Their Therapeutic Uses. **International Journal of Plant Biology,** vol. 13, p. 4-14, 21 fev. 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2037-0164/13/1/3/htm>. Acesso em: 25 nov. 2024.

HANKE, G.; MULO, P. Plant type ferredoxins and ferredoxin-dependent metabolism. **Plant, Cell & Environment**, v. 36, n. 6, p. 1071–1084, jun. 2013. DOI: 10.1111/PCE.12046. Disponível em: https://doi.org/10.1111/pce.12046. Acesso em: 23 mai. 2024.

HARVEY, David. **Los límites del capitalismo y la teoría marxista**. Cidade do México: Fondo de Cultura Económica, 1990.

HEIL, M.; BALDWIN, I. T. Fitness costs of induced resistance: emerging experimental support for a slippery concept. **Trends in plant science**, v. 7, n. 2, p. 61–67, 1 fev. 2002. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11832276/>. Acesso em: 8 maio 2024.

HOAGLAND, D.R. 1944. Lectures on the inorganic nutrition of plants (Prather lectures of Harvard University). **Chronica Botanica** CO., Waltham. 226 p.

HORIKOSHI, R. J. et al. Resistance status of lepidopteran soybean pests following large-scale use of MON 87701 × MON 89788 soybean in Brazil. **Scientific Reports** 2021. v. 11, n. 1, p. 1–15, 29 out. 2021. Disponível em: https://www.nature.com/articles/s41598-021-00770-0. Acesso em: 31 jul. 2024.

HUANG, J.; LI, Z.; LIAW, B. Y. *et al*. Entropy coefficient of a blended electrode in a lithium-ion cell. **Journal of The Electrochemical Society**, v. 162, n. 12, p. A2367–A2371, 2015. DOI: 10.1149/2.0811512JES/XML. Disponível em: https://iopscience.iop.org/article/10.1149/2.0811512jes. Acesso em: 8 jul. 2024.

HUANG, J; RUIFA, H. U. ; MEIJL, H. *et al*. Biotechnology boosts to crop productivity in China: trade and welfare implications. **Journal of Development Economics**, v. 75, n. 1, p. 27–54, oct. 2004. DOI: 10.1016/j.jdeveco.2003.07.005. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jdeveco.2003.07.005. Acesso em: 10 jul. 2024.

HUANG, K. **Safety assessment of genetically modified foods**. Singapore: Springer, 2017. DOI: 10.1007/978-981-10-3488-6/COVER. Acesso em: 5 mai. 2024.

IGARI, A. T.; TAMBOSI, L R. Agribusiness and Socioeconomic Drivers of Land Cover Change in Brazil. Biodiversity in Agricultural Landscapes of Southeastern Brazil. De Gruyter Open. 2016. p. 28–42. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/345004739_3_Agribusiness_and_Socioeconomic_Drivers_of_Land_Cover_Change_in_Brazil>. Acesso em: 29 jul. 2024.

IMAS, P.; MAGEN, H Role of potassium nutrition in balanced fertilization for soybean yield and quality-global perspective. *In*: IMAS, P.; VYAS, A. K. (eds). **Proceedings of regional seminar on recent advances in potassium nutrition management for soybean based cropping system**. Indore, India: National Research Centre for Soybean, 2007. Acesso em: 17 jun. 2024.

ISHIMOTO, M. et al. Evaluation of amino acid content and nutritional quality of transgenic soybean seeds with high-level tryptophan accumulation. **Molecular Breeding,** v. 25, n. 2, p. 313–326, 17 set. 2010. doi: 10.1007/s11032-009-9334-3. Acesso em: 25 nov. 2024.

ISLAM, T.; RAHMAN, M.; PANDEY, P.(orgs.). **Bacilli in agrobiotechnology**: plant stress tolerance, bioremediation, and bioprospecting. Cham: Springer, 2022. DOI: 10.1007/978-3-030-85465-2. Acesso em: 2 mai. 2024.

JABEEN, R.; KHAN, M.S.; ZAFAR, Y.; ANJUM, T. Codon optimization of cry1Ab gene for hyper expression in plant organelles. **Molecular Biology Reports**, 37, 1011, 2010. doi: 10.1007/s11033-009-9802-1

JEVONS, W. S. **The Coal Question;** An Inquiry concerning the Progress of the Nation, and the Probable Exhaustion of our Coal-mines. Macmillan and Co. vol. 2. Londres, 1866.

JIN, S.; DANIELL, H. The Engineered Chloroplast Genome Just Got Smarter. **Trends in Plant Science**, v. 20, n. 10, p. 622–640, 2015. doi:10.1016/j.tplants.2015.07.004.

JONES, C. M.; PARRY, H.; TAY, W. T. *et al*. Movement ecology of pest helicoverpa: implications for ongoing spread. **Annual review of entomology**, v. 64, p. 277–295, 2019. DOI:10.1146/annurev-ento-011118-111959. Disponível em: https://doi.org/10.1146/annurev-ento-011118-111959. Acesso em: 5 mai. 2024.

JONG, W. Biotechnology and the future of world agriculture. **Brittonia,** v. 43, n. 4, p. 279–280, 1991. DOI: 10.2307/280729410.2307/2807294. Disponível em: https://doi.org/10.2307/280729410.2307/2807294. Acesso em: 10 jul. 2024.

JOSE, M. et al. Comparing agronomic and phenotypic plant characteristics between single and stacked events in soybean, maize, and cotton. **PLOS ONE**, v. 15, n. 4, p. e0231733, 1 abr. 2020. Disponível em: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0231733>. Acesso em: 8 maio 2024.

KALAITZANDONAKES, N. G. Agrobiotechnology and competitiveness. **American Journal of Agricultural Economics**, v. 82, n. 5, p.1224–1233, 2000. DOI: 10.1111/0002-9092.00125. Disponível em: https://doi.org/10.1111/0002-9092.00125. Acesso em: 2 mai. 2024.

KAUR, P.; DILAWARI, V. K. Inheritance of resistance to Bacillus thuringiensis Cry1Ac toxin in Helicoverpa armigera (Hübner) (Lepidoptera: Noctuidae) from India. **Pest Management Science**, v. 67, n. 10, p. 1294–1302, 2011. DOI: 10.1002/PS.2185. Disponível em: https://doi.org/10.1002/ps.2185. Acesso em: 5 mai. 2024.

KESSLER, A.; BALDWIN, I. T. Herbivore-induced plant vaccination. Part I. The orchestration of plant defenses in nature and their fitness consequences in the wild tobacco Nicotiana attenuata. **Plant Journal**, v. 38, n. 4, p. 639–649, 2004. DOI: 10.1111/j.1365-313X.2004.02076.x. Disponível em: https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2004.02076.x. Acesso em: 8 mai. 2024.

KHETKORN, W.; RASTOGI, R. P.; INCHAROENSAKDI, A. *et al*. Microalgal hydrogen production: a review. **Bioresource Technology**, v. 243, p. 1194–1206, 2017. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.07.085. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.085. Acesso em: 2 jul. 2024.

KOOIJMAN, S. A. L. The Synthesizing Unit as model for the stoichiometric fusion and branching of metabolic fluxes. **Biophysical Chemistry**, v. 73, n. 1–2, p. 179–188, jul. 1998. DOI:10.1016/S0301-4622(98)00162-8. Disponível em: https://doi.org/10.1016/S0301-4622(98)00162-8. Acesso em: 7 jul. 2024.

KOUL, B. Transgenics and crop improvement. In: KOUL, B. **Cisgenics and**

KRÄMER, U. Metal hyperaccumulation in plants. **Annual Review of Plant Biology**, v. 61, n. 1, p. 517–534, 2010. DOI: 10.1146/annurev-arplant-042809-112156. Disponível em: https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042809-112156. Acesso em: 7 mai. 2024.

KREUZ, C. L.; LANZER, E. A.; PARIS, Q. Funções de produção von Liebig com rendimentos decrescentes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 30, n. 1, p. 95–106, 1995. Disponível em: https://seer.sct.embrapa.br/index.php/pab/article/view/4280. Acesso em: 15 jun. 2024.

KREUZ, C. L.; LANZER, E. A.; PARIS, Q. Modificação nas funções de produção de Liebig. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 32, n. 2, p. 193–218, 1994. Disponível em: http://www.resr.periodikos.com.br/journal/resr/article/5e9321fe0e8825c33edafd06. Acesso em: 15 jun. 2024.

KUDELKA, W.; KOWALSKA, M.; POPIS, M. Quality of Soybean Products in Terms of Essential Amino Acids Composition. **Molecules** 2021, Vol. 26, Page 5071, v. 26, n. 16, p. 5071, 21 ago. 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1420-3049/26/16/5071/htm>. Acesso em: 25 nov. 2024.

KUMUDINI, S.; HUME, D. J.; CHU, G. Genetic improvement in short-season soybeans: II. Nitrogen accumulation, remobilization, and partitioning. **Crop Science**, v. 42, n. 1, p. 141–145, jan.-feb.2002. DOI: 10.2135/CROPSCI2002.1410. Disponivel em: https://doi.org/10.2135/cropsci2002.1410. Acesso em: 9 jul. 2024.

LANG, E. The Law of the Soil. ln: Spillman, W. J. **The Law of Diminishing Returns**. Word Book Company. 178p. 1924.

LANZER, E. A.; PARIS, Q.; WILLIAMS, W. A. A dynamic model for technical and economic analysis of fertilizer recommendations. **Agronomy Journal**, v. 73, n. 4, p. 733–737, 1981. DOI: 10.2134/agronj1981.00021962007300040040X. Disponível em: https://doi.org/10.2134/agronj1981.00021962007300040040x. Acesso em: 7 jul. 2024.

LAPIDUS, I.; OSTROVITIANOV, K. **Principios de economia política**. Rio de Janeiro: Calvino, 1944. (Coleção de Estudos Sociais, v.1, 3).Disponível em: https://bibliotecadigital.seade.gov.br/view/singlepage/index.php?pubcod=10014060&parte=1. Acesso em: 25 jun. 2024.

LEAL, L.C.; LANNUZZI, L.; LEAL, I.R. Liberação ecológica de espécie invasora: entomofauna associada à Calotropis procera não afeta a germinação de sementes. **Revista Nordestina de Zoologia**, v. 4, p.112-117, 2010.

LEE, H.; PARK, S.; ZHANG, Z. J. *et al*. An overview of genetic transformation of soybean. *In*: BOARD, J.E. (ed). **A comprehensive survey of international soybean research:** genetics, physiology, agronomy and nitrogen relationships. InTech; 2013. Cap. 23. DOI: 10.5772/51076. Disponível em: http://dx.doi.org/10.5772/51076. Acesso em: 1 jul. 2024.

LERAYER, A.; GRAVINA, M.; OLIVEIRA, A. L. R. *et al*. Biotecnologia avança no Brasil. **AgroANALYSIS**, v. 31, n. 01, p. 29–35, jan. 2011. Disponível em: https://periodicos.fgv.br/agroanalysis/article/view/26061/24925. Acesso em: 21 jun. 2024.

LEVINE, S. L.; FRIDLEY, J. M.; UFFMAN, J. P. *et al*. Assessing the potential for interaction in insecticidal activity between MON 87751 × MON 87701 produced by conventional breeding. **Environmental Entomology**, v. 48, n. 5, p.1241–1248, 2019. doi: 10.1093/EE/NVZ082. Disponível em: https://doi.org/10.1093/ee/nvz082. Acesso em: 8 mai. 2024.

LI, X. H.; WANG, Y. J.; WU, B. *et al*. GmPHR1, a novel homolog of the AtPHR1 transcription factor, plays a role in plant tolerance to phosphate starvation. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 13, n. 12, p. 2584–2593, dec. 2014. DOI: 10.1016/S2095-3119(14)60775-9. Disponível em: https://doi.org/10.1016/S2095-3119(14)60775-9. Acesso em: 8 jul. 2024.

LIEBER, R. R.; ROMANO-LIEBER, N. S. A sustentabilidade é sustentável?. Educando com o conceito de risco. *In*: PHILIPPI JR., A.; PELICIONI, M.C.F. (eds.). **Educacao ambiental e sustentabilidade**. 2.ed. Barueri: Manole, 2014. Cap. 37, p.765-786. Disponível em: https://repositorio.usp.br/item/002466959. Acesso em: 16 mai. 2024.

LIEBIG, J. von. Sechsundvierzigster Brief. *In*: HEIDELBERG. C. F. (org.) **Chemische Briefe von Justus von Liebig**. Leipzig. 1878b. Disponível em: https://www.liebig-museum.de/chemische-briefe/. Acesso em: 18 fev. 2022.

LIEBIG, J. von. Vierundvierzigster Brief. *In*: HEIDELBERG. C. F. (org.) **Chemische Briefe von Justus von Liebig**. Leipzig. 1878a. Disponível em: https://www.liebig-museum.de/chemische-briefe/. Acesso em: 18 fev. 2022.

LIMA, D.; SILVA FILHO, P. M.; OLIVEIRA, A. B. de**. A inserção da soja RoundUp Ready TM no registro nacional de cultivares**. VIII Congresso Brasileiro De Soja. Goiânia, 2018. p. 92–94. 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1092763/a-insercao-da-soja-roundup-ready-tm-no-registro-nacional-de-cultivares>. Acesso em: 30 jul. 2024.

LIMA, H. N. **Gênese, química, mineralogia e micromorfologia de solos da Amazônia Ocidental**. 2001. 176 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2001. Acesso em: 25 jun. 2024.

LUCENA, W. A. et al. Molecular Approaches to Improve the Insecticidal Activity of Bacillus thuringiensis Cry Toxins. **Toxins**. 2014, Vol. 6, Pages 2393-2423, v. 6, n. 8, p. 2393–2423, 13 ago. 2014. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-6651/6/8/2393/htm>. Acesso em: 25 jun. 2024.

MA, X.; ZHU, Z.; LI, Y. *et al*. Expressing a modified cowpea trypsin inhibitor gene to increase insect tolerance against Pieris rapae in Chinese cabbage. **Horticulture Environment and Biotechnology**, v. 58, n. 2, p. 195–202, 2017. DOI: 10.1007/s13580-017-0188-z. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s13580-017-0188-z. Acesso em: 7 mai. 2024.

MACPHERSON, J.; VOGLHUBER-SLAVINSKY, A.; OLBRISCH, M. *et al*. Future agricultural systems and the role of digitalization for achieving sustainability goals. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 42, n. 4, p. 1–18, 2022. DOI: 10.1007/s13593-022-00792-6. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s13593-022-00792-6. Acesso em: 9 jul. 2024.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Editora Ceres, 2006. 638 p.

MANSOORI, B.; MOHAMMADI, A.; HASHEMZADEH, S. *et al*. Urtica dioica extract suppresses miR-21 and metastasis-related genes in breast cancer. **Biomedicine & Pharmacotherapy**, v. 93, p. 95–102, 2017. DOI: 10.1016/j.biopha.2017.06.021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.biopha.2017.06.021. Acesso em: 1 jul. 2024.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E.M. **Metodologia científica**. São Paulo: Atlas, 2010.

MARCUZZO, F. F. N.; CARDOSO, M. R. D.; FARIA, T. G. Chuvas na Amazônia mato-grossense: análise histórica e tendência futura. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia v.12, n. 38, p. 65 – 75, jun. 2011. Disponível em: http://rigeo.sgb.gov.br/jspui/handle/doc/18871. Acesso em: 21 jun. 2024.

MARINHO, C. D.; MARTINS, F. J. O.; AMARAL JR., A. T. *et al*. Genetically modified crops: Brazilian law and overview. **Genetics and Molecular Research**, v. 13, n. 3, p. 5221–5240, 2014. DOI: 10.4238/2014.July.7.15. Disponível em: https://doi.org/10.4238/2014.july.7.15. Acesso em: 5 mai. 2024.

MARINHO, C. D.; MARTINS, F. J.; AMARAL JR., A.T. *et al*. Use of transgenic seeds in Brazilian agriculture and concentration of agricultural production to large agribusinesses. **Genetics and Molecular Research**, v. 11, n. 3, p. 1861–1880, 2012. DOI: 10.4238/2012.July.19.6. Disponível em: https://doi.org/10.4238/2012.july.19.6. Acesso em: 5 mai. 2024.

MARQUES, G. S. **Amazônia**: riqueza, degradação e saque. São Paulo: Expressão Popular, 2018.

MARTIN, T. N.; PIRES, J. L. F.; VEY, R. T. **Tecnologias aplicadas para o manejo rentável e eficiente da cultura da soja**. Editora GR, 2022. Disponivel em: http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1146696. Acesso em: 11 set. 2024.

MARTINE, G.; ALVES, J. E. D. Economia, sociedade e meio ambiente no século 21: tripé ou trilema da sustentabilidade? **Revista Brasileira de Estudos de População**, v. 32, n. 3, p. 433–459, 2015. DOI: 10.1590/S0102-3098201500000027. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0102-3098201500000027. Acesso em: 16 mai. 2024.

MASSRUHÁ, S. M. F.; LEITE, M. A. A.; LUCHIARI JR., A. *et al*. A transformação digital no campo rumo à agricultura sustentável e inteligente. In: MASSRUHÁ, S. M. F.; LEITE, M. A. A.; OLIVEIRA, S. R. M. *et al.* (eds.). **Agricultura digital**: pesquisa, desenvolvimento e inovação nas cadeias produtivas. Brasília, DF: Embrapa, 2020. Cap.1, p. 20-45. Disponível em: http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1126214. Acesso em: 22 jun. 2024.

MATYTSIN, D. E.; ANISIMOV, A. P.; INSHAKOVA, A. O. legal regulation of the turnover of biotechnologies in Russia, in countries of the BRICS and of the EAEU: certification and labeling of GMO products. *In*: POPKOVA, E.G.; SERGI, B.S.(eds). **Geo-economy of the future:** sustainable agriculture and alternative energy. Cham: Springer, 2022. v. 2, p. 409–420. DOI: 10.1007/978-3-030-92303-7_44. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-030-92303-7_44. Acesso em: 30 jun. 2024.

MCLAREN, J. S. Crop biotechnology provides an opportunity to develop a sustainable future. **Trends in Biotechnology**, v. 23, n. 7, p. 339–342, 2005. DOI: 10.1016/j.tibtech.2005.04.004. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2005.04.004. Acesso em: 10 jul. 2024.

MEBRATU, D. Sustainability and sustainable development: historical and conceptual review. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 18, n. 6, p. 493–520, 1998. DOI: 10.1016/S0195-9255(98)00019-5. Disponível em: https://doi.org/10.1016/S0195-9255(98)00019-5. Acesso em: 9 jul. 2024.

MELGAREJO, L. A soja transgênica no Rio Grande o Sul – SAFRA 2003/04. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 2, n.1, 2007. Disponível em: https://revista.aba-agroecologia.org.br/rbagroecologia/article/view/6289. Acesso em: 7 jul. 2024.

MENEGATTI, A. L. A.; BARROS, A. L. M. Análise comparativa dos custos de produção entre soja transgênica e convencional: um estudo de caso para o Estado do Mato Grosso do Sul. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 45, n. 1, p.163-183, 2007. DOI: 10.1590/S0103-20032007000100008. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0103-20032007000100008. Acesso em: 22 jun. 2024.

MENESES, A. V.; FAVRETO, E. K. A mudança no modo de conceber a ciência a partir do método hipotético-dedutivo de Karl Popper. *In:* ZANETTE, E. V. C.; FAVRETO, E. K. (orgs.). **Encontros filosóficos**. Boa Vista, RR: UERR Edições, 2021. Cap. 1, p. 8-20. Disponível em: https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=F65TEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA8&dq=popper&ots=9Nj_zhwL2Q&sig=dlCp_sWmPO4MUn2xLhJrqVZgwwY#v=onepage&q=popper&f=false. Acesso em: 22 abr. 2022.

MENSAH, J. Sustainable development. Meaning, history, principles, pillars, and implications for human action: Literature review. **Cogent Social Sciences**, v. 5, n. 1, 2019. DOI: 10.1080/23311886.2019.1653531. Disponível em: https://doi.org/10.1080/23311886.2019.1653531. Acesso em: 9 jul. 2024.

MIRANDA, R. R.; SILVA, M. A. P. Das agroestratégias aos eixos territoriais do agronegócio no estado do Pará. **Boletim DATALUTA**, v. 9, n. 99, 2024. Disponível em: https://periodicos.unb.br/index.php/BD/article/view/52958. Acesso em: 22 jun. 2024.

MITCHELL, P. Coupling of phosphorylation to electron and hydrogen transfer by a chemi-osmotic type of mechanism. **Nature**, v. 191, n. 4784, p. 144–148, 1961.

MITSCHERLICH, E. A. Das Gesetz des Minimums und das Gesetz des abnehmenden Bodenertrages. 1909. **Landwirtsch Jahrbuch**, 38, 537-552.

MONERATO, L. **Terra fictícia:** capital financeiro e renda fundiária. Lutas Anticapital, 2022.

NACHTERGAELE, F. O. Classification systems: FAO. *In*: **Reference module in earth systems and environmental sciences**. Elsevier, 2017. DOI: 10.1016/B978-0-

12-409548-9.10520-2. Disponível em: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10520-2

NAEGELI, H.; BRESSON, J.L.; EFSA PANEL ON GENETICALLY MODIFIED ORGANISMS (GMO) *et al*. Assessment of genetically modified soybean MON 87751 × MON 87701 × MON 87708 × MON 89788 for food and feed uses, under Regulation (EC) No 1829/2003 (application EFSA-GMO-NL-2016-128). **EFSA Journal**, *[S. l.]*, v. 17, n. 11, e05847, 2019. DOI: 10.2903/J.EFSA.2019.5847. Disponível em: https://www.efsa.europa.eu/en/efsajournal/pub/5847. Acesso em: 28 jun. 2024.

NOVAES, H. T. Reestruturação do campo e o fetichismo da “revolução verde”. **Revista Ciências do Trabalho**, v. 0, n. 9, 21 dez. 2017. Disponível em: https://rct.dieese.org.br/index.php/rct/article/view/152. Acesso em: jul. 2023.

OBJETIVOS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL – ODS. **Parcerias e meios de implementação**. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/17. Acesso em: 18 jun. 2023.

OLIPHANT, A.; THENKABAIL, P.; TELUGUNTLA, P. **Global food-security-support-analysis data at 30-m resolution (GFSAD30) cropland-extent products**. Download Analysis. Reston, VA: Geological Survey, 2022. v.2022-1001. DOI: 10.3133/ofr20221001. (Open-File Report**)**. Disponível em: https://doi.org/10.3133/ofr20221001. Acesso em: 21 jun. 2024.

OLIVEIRA NETO, A. A.(org.); Diretoria de Política Agrícola e Informações da Superintendência de Informações do Agronegócio. **Evolução dos custos de produção de soja no Brasil**. Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento, 2016. (Compêndio de estudos Conab, v.2). Disponível em: https://www.conab.gov.br/institucional/publicacoes/compendio-de-estudos-da-conab/item/download/2512_c2638f76696e3b926ab22e93f9549d21. Acesso em: 10 jul. 2024.

OLIVEIRA, C. M.; SANTANA, A. C.; HOMMA, A. K. O. Os custos de produção e a rentabilidade da soja nos municípios de Santarém e Belterra, estado do Pará. **Acta Amazonica**, v. 43, n. 1, p. 23–31, 2013. DOI: 10.1590/S0044-59672013000100004. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0044-59672013000100004. Acesso em: 10 jul. 2024.

ORGANIZAÇÃO PARA ALIMENTAÇÃO E AGRICULTURA – FAO. **PARECER TÉCNICO Nº 5832/2018**. 2018. Disponível em: https://www.fao.org/fileadmin/user_upload/gmfp/docs/Parecer%20T%C3%A9cnico%20n%C2%BA%205832%20-%202018.pdf. Acesso em: 9 jul. 2024.

OSÓRIO, R. M. L. **A produção de soja no oeste do Pará**: a tomada de decisão do produtor rural e as características da atividade produtiva em meio à floresta amazônica. 2018. 174 f. Tese (Doutorado em Desenvolvimento Sustentável) - Universidade de Brasília, Brasília, 2018. Disponível em: http://repositorio2.unb.br/jspui/handle/10482/33908. Acesso em: 21 jun. 2024.

PANDEY, A.; SWARNKAR, V.; PANDEY, T. et al. Transcriptome and metabolite analysis reveal candidate genes of the cardiac glycoside biosynthetic pathway from Calotropis procera. **Scientific reports**. v. 6, p. 34464, 2016. DOI: 10.1038/srep34464

PARIS, Q.; PARIS, P. A von Liebig response function to nitrogen and phosphorus for hay production from irrigated pastures. **Grass and Forage Science**, v. 40, n. 2, p. 213–220, jun.1985. DOI: 10.1111/J.1365-2494.1985.TB01739.X. Disponível em: https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.1985.tb01739.x. Acesso em: 15 jun. 2024.

PEREIRA, F. N.; SANTOS, K. S.; LUZ, M. R. *et al*. Alimentos e agrotóxicos: a percepção de estudantes de um curso técnico em agropecuária do Sudeste do Pará. **Cadernos de Agroecologia**, v. 15, n. 2, 2020. Disponível em: https://cadernos.aba-agroecologia.org.br/cadernos/article/view/6217/2581. Acesso em: 10 jul. 2024.

PÉREZ-MASSOT, E.; BANAKAR, R.; GÓMEZ-GALERA, S. *et al*. The contribution of transgenic plants to better health through improved nutrition: opportunities and constraints. **Genes and Nutrition**, v. 8, n. 1, p. 29 - 41, 2013. DOI: 10.1007/s12263-012-0315-5. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s12263-012-0315-5. Acesso em: 9 jul. 2024.

PHALAN, B. T. What Have we learned from the land sparing-sharing model? **Sustainability**, v. 10, n. 6, 2018. DOI: 10.3390/SU10061760. Disponível em: https://doi.org/10.3390/su10061760. Acesso em: 12 mai. 2024.

PHALAN, B. T; GREEN, R. E.; DICKS, L.V. *et al*. How can higher-yield farming help to spare nature? **Science**, v. 351, n. 6272, p. 450–451, 2016. DOI: 10.1126/SCIENCE.AAD0055. Disponível em: https://doi.org/10.1126/science.aad0055. Acesso em: 12 mai. 2024.

PINAZZA, G. G. M. **Análise da competitividade da cadeia produtiva da soja no Brasil vis-à-vis os demais países exportadores sul-americanos**. 2008. 130 f. (Dissertação de Mestrado em Ciências Exatas e da Terra) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2008. Disponível em: https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/3574. Acesso em: 12 jun. 2024.

PLATAFORMA INTACTA**. Movimento #refúgio preserva**. 2024. Disponível em: https://plataformaintacta2xtend.com.br/refugiopreserva. Acesso em: 20 de jun. de 2024.

PLUCKNETT, D. L.; WINKELMANN, D. L. Technology for sustainable agriculture. **Scientific American**, v. 273, n. 3, p. 182–186, 1995. Disponível em: http://www.jstor.org/stable/24981783. Acesso em: 12 jun. 2024.

RANGEL, E.S.; NASCIMENTO, M. T. Ocorrência de Calotropis procera (Ait.) R. Br. (Apocynaceae) como espécie invasora de restinga. **Acta Botanica Brasilica**, v. 25, n. 3, p. 657–663, 2011. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0102-33062011000300019. Acesso em: 1 jul. 2024.

RANJEKAR, P. K.; PATANKAR, A.; GUPTA, V. *et al*. Genetic engineering of crop plants for insect resistance. **JSTOR Current Science**, v. 84, n. 3, p. 321–329, feb. 2003. Disponível em: http://www.jstor.org/stable/24107416. Acesso em: 2 jul. 2024.

REIS, E. A.; REIS, I. A. **Análise descritiva de dados**: relatório técnico do departamento de estatística da UFMG. Minas Gerais: Universidade Federal de Minas Gerais; Instituto de Ciências Exatas Departamento de Estatística, jun. 2002. Disponível em: https://www.est.ufmg.br/portal/wp-content/uploads/2023/01/RTE-02-2002.pdf. Acesso em: 2 jul. 2024.

RESENDE, A. V.; BORGHI, E.; GONTIJO NETO, M. M. *et al.* Balanço de nutrientes e manejo da adubação em solos de fertilidade construída. *In:* SEVERIANO, E. C.; MORAIS, M. F.; PAULA, A. M. (org.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2019. v. 10, p. 342–389. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1113497/balanco-de-nutrientes-e-manejo-da-adubacao-em-solos-de-fertilidade-construida. Acesso em: 8 jul. 2024.

RIBEIRO, C. D.; SCHIOCCHET, T. A sociedade civil na composição da Comissão Técnica Nacional de Biossegurança: dificuldades para formação de uma governança biotecnológica. **Revista do Direito Público**, v. 8, n. 2, p. 9–34, 2013. DOI: 10.5433/1980-511X.2013v8n2p9. Disponível em: https://ojs.uel.br/revistas/uel/index.php/direitopub/article/view/15272. Acesso em: 1 mai. 2024.

RIBEIRO, G.B.; ALMEIDA, H.C.; VELARDE, D. T. *et al*. Study of crotoxin on the induction of paralysis in extraocular muscle in animal model. **Arquivos Brasileiros de Oftalmologia**, v. 75, n. 5, p. 307–312, sep. 2012. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0004-27492012000500002. Acesso em: 15 mai. 2024.

RICHARDS, P. D.; WALKER, R.T.; ARIMA, E. Y. Spatially complex land change: the indirect effect of Brazil's agricultural sector on land use in Amazonia. **Global Environmental Change**, v. 29, p. 1–9, 2014. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2014.06.011. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.06.011. Acesso em: 5 mai. 2024.

RODRIGUES, M. R. L. **Disponibilidade de micronutrientes em solos da Amazônia**. 1998. 156 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998. Disponível em: http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/666829. Acesso em: 11 abr. 2024.

RUDEL, T.K.; SCHNEIDER, L.; URIARTE, M. *et al*. Agricultural intensification and changes in cultivated areas, 1970-2005. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 106, n. 49, p. 20675–20680, 2009. DOI: 10.1073/PNAS.0812540106. Disponível em: https://doi.org/10.1073/pnas.0812540106. Acesso em: 6 mai. 2024.

RUIZ, L. P.; HERNÁNDEZ-FERNÁNDEZ, J.; VILLEGAS, J. B. Toxicidad de δ-endotoxinas recombinantes de Bacillus thuringiensis sobre larvas de la polilla

guatemalteca (Tecia solanivora) (Lepidóptera: Gelechiidae). **Revista Colombiana de Biotecnología**, v. 10, n. 2, p. 85–96, 2008. Disponível em: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-34752008000200010&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 1 jul. 2024.

SAITO, K. Marx's Theory of Metabolism in the Age of Global Ecological Crisis. **Historical Materialism**, 28(2), 3-24, 2020. doi: https://doi.org/10.1163/1569206X-20202802.

SANAHUJA, G.; BANAKAR, R.; TWYMAN, R. M.; CAPELL, T.; CHRISTOU, P. Bacillus thuringiensis: a century of research, development and commercial applications. **Plant biotechnology journal**, v. 9, n. 3, p. 283–300, abr. 2011.

SANTANA, R. B. O. **Efeito da variação pluviométrica sobre a produtividade agrícola e sobre os padrões de uso do solo**. 2022. 86 f. Dissertação (Mestrado em Economia) - Faculdade de Economia, Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 2022. Disponível em: https://repositorio.ufba.br/handle/ri/36378. Acesso em: 11 jul. 2024.

SANTANA, S. **Controle de Spodoptera frugiperda (J.E. SMITH), Spodoptera cosmioides (WALKER) e Spodoptera eridania (CRAMER) pela soja intacta RR2 PRO®, CONKESTA E3® E INTACTA 2 XTEND®.** 2023. 41fls.Trabalho de Conclusão de Curso. (Bacharelado em Engenharia Agronômica) Universidade do Estado da Bahia. Barreiras, 2023.

SANTOS, C. M.L. **Estatística descritiva:** manual de auto-aprendizagem. 3.ed. Lisboa: Edições Sílabo, 2007. Disponível em: https://static.fnac-static.com/multimedia/PT/pdf/9789726189688.pdf. Acesso em: 8 jul. 2024.

SANTOS, L. P.; BRAGANÇA, S. M.; SILVA, E. D. B. **Dinâmica de Nutrientes e Atributos Químicos do Perfil do Solo em Resposta à Aplicação de Calcário na Cultura de Guaranazeiro em Formação no Município de Maués, Estado do Amazonas. XXIX Reunião Brasileira de Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas.** Viçosa, 2010. Disponível em: https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/867085. Acesso em: 25 jun. 2024.

SARTORI, S.; LATRÔNICO, F.; CAMPOS, L. M. S. Sustentabilidade e desenvolvimento sustentável: uma taxonomia no campo da literatura. **Ambiente & Sociedade**, v. 17, n. 1, p. 01–22, 2014. DOI: 10.1590/S1414-753X2014000100002. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1590/S1414-753X2014000100002. Acesso em: 9 jul. 2024.

SAUER, S. Soy expansion into the agricultural frontiers of the Brazilian Amazon: the agribusiness economy and its social and environmental conflicts. **Land Use Policy**, v. 79, p. 326–338, 2018. DOI: 10.1016/j.landusepol.2018.08.030. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.08.030. Acesso em: 14 fev. 2024.

SAUER, S.; PIETRAFESA, J. P. Novas fronteiras agrícolas na Amazônia: expansão da soja como expressão das agroestratégias no Pará. **Revista ACTA Geográfica**, p.

245–264, 2013. DOI: 10.5654/ACTAGEO2013.0003.0013. Disponível em: http://dx.doi.org/10.5654/actageo2013.0003.0013. Acesso em: 5 mai. 2024.

SCHLOTTMANN, C.; JAMIESON, D.; JEROLMACK, C. *et al*. (eds.). **Environment and Society:** a reader. New York, USA: New York University Press, 2017. DOI: 10.2307/j.ctt1ht4vw6. Disponível em: https://doi.org/10.2307/j.ctt1ht4vw6. Acesso em: 5 mai. 2024.

SCHNITKEY, G.; PAULSON, N.; ZULAUF, C. Nitrogen fertilizer prices and supply in light of the Ukraine-Russia conflict. **Farmdoc daily**, v.12, n. 45, 2022. Disponível em: https://farmdocdaily.illinois.edu/2022/04/nitrogen-fertilizer-prices-and-supply-in-light-of-the-ukraine-russia-conflict.html. Acesso em: 12 jun. 2024.

SFREDO, J.; OLIVEIRA, M. C. N. **Soja molibdênio e cobalto**. Londrina: Embrapa Soja, 2010., v. 322, 2010. Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/18872/1/Doc_322_online1.pdf. Acesso em: 12 jun. 2024.

SHAHEEN, N.; SHAHZAIB, M.; KHAN, U. M. *et al*. Genetically modified organisms for crop biofortification. **Biofortification of Grain and Vegetable Crops:** Molecular and Breeding Approaches, p. 19–37, 2024. DOI: 10.1016/B978-0-323-91735-3.00002-9. Disponível em: https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91735-3.00002-9. Acesso em: 8 jul. 2024.

SHARMA, R.; THAKUR, G. S.; SANODIYA, B. S. *et al*. Therapeutic Potential of Calotropis procera: a giant milkweed. **IOSR Journal of Pharmacy and Biological Sciences**, v. 4, n. 3, p. 42–57, 2012. DOI: 10.9790/3008-0424257. Disponível em: http://dx.doi.org/10.9790/3008-0424257. Acesso em: 1 jul. 2024.

SHELKE, D. B.; CHAMBHARE, M. R.; NIKALJE, G. C. *et al*. Improvement of soybean crop for yield, stress tolerance, and value-added products using a transgenic approach. **Advances in Agriculture**, v. 2023, n. 1, p. 8166928, 2023. DOI: 10.1155/2023/8166928. Disponível em: https://doi.org/10.1155/2023/8166928. Acesso em:17 jun. 2024.

SILVA, A. P. M. **Expressão gênica associada à resistência da soja a *Piezodorus guildinii*.** 2013. 124 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013. Disponível em: https://doi.org/10.11606/D.11.2014.tde-20032014-165537

SILVA, E. V.; DALCIN, E.; BROGIN, R. L. *et al*. Custos de produção de soja convencional e transgênica: oportunidades de negócios com o cultivo de soja convencional no estado de Mato Grosso. *In*: REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA, 37., 2019, Londrina. **Resumos expandidos**. Londrina: Embrapa Soja, 2019. (Embrapa Soja. Documentos, 413). p. 253-256. Disponível em: http://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1111437. Acesso em: 23 mai. 2024.

SILVA, J. G.; FERREIRA FILHO, J. Climate change, agriculture and livestock intensification in Brazil: the borlaug hypothesis. *In:* XLIII ENCONTRO NACIONAL DE ECONOMIA, 2016. **Anais** ...do [Proceedings of the 43rd Brazilian Economics

Meeting] da ANPEC - Associação Nacional dos Centros de Pós-Graduação em Economia. Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: https://econpapers.repec.org/RePEc:anp:en2015:184. Acesso em: 9 jun. 2024.

SIMMS, E. L.; FRITZ, R. S. The ecology and evolution of host-plant resistance to insects. **Trends in ecology & evolution**.v. 5, n. 11, p. 356–360, 1990. DOI: 10.1016/0169-5347(90)90094-TD

SINGH, N. K.; BARANWAL, J.; PATI, S. *et al*. Application of plant products in the synthesis and functionalisation of biopolymers. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 237, p. 124174, 2023. DOI: 10.1016/J.IJBIOMAC.2023.124174. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124174. Acesso em: 1 jul. 2024.

SIQUEIRA, P. R. E.; SIQUEIRA, P. R. B. Evolução dos Níveis de Fertilidade do Solo em Lavouras de Soja Interpretados com duas Recomendações Oficiais. **Revista Científica Rural**, v. 20, n. 1, p. 92–107, 2 maio 2018. Disponível em: <http://revista.urcamp.tche.br/index.php/RCR/article/view/262>. Acesso em: 11 set. 2024.

SKOVMAND, L.; O'DEA, R. E.; GREIG, K. A. *et al*. Effects of leaf herbivory and autumn seasonality on plant secondary metabolites: a meta-analysis. **Ecology and evolution**, v. 14, n. 2, p. e10912, 2024. DOI:10.1002/ece3.10912. Disponível em: https://doi.org/10.1002/ece3.10912http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/38357594. Acesso em: 8 mai. 2024.

SOCIEDADE NACIONAL DE AGRICULTURA – SNA. **Brasil terá mais soja não transgênica em 2022/23 com demanda da União Europeia e prêmio em alta**. SNA, 24 jun. 2022. Disponível em: https://www.sna.agr.br/brasil-tera-mais-soja-nao-transgenica-em-2022-23-com-demanda-da-uniao-europeia-e-premio-em-alta/. Acesso em: mai. 2023

SOUZA, S. T; SANTOS, J. R.D.; MENEZES, S.O. Renda da terra: conceito central para os estudos em geografia agrária. **Pegada**: A revista da geografia do trabalho, v. 20,n.1, p.144–169, 2019. DOI: 10.33026/peg.v20i1.5817. Disponível em: https://doi.org/10.33026/peg.v20i1.5817. Acesso em: 8 mai. 2024.

SPECHT, A. et al. Identificação morfológica e molecular de Helicoverpa armigera (Lepidoptera: Noctuidae) e ampliação de seu registro de ocorrência no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 6, p. 689–692, 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/VwpF48tM7sV6J575jQDMzry/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 11 set. 2024.

SPIRI, Felipe. **Conhecimento e meio ambiente**: efeitos do ensino superior no uso da terra e consequências no desmatamento. 2022. 63 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Economia) - Instituto de Ensino e Pesquisa, São Paulo, 2022.Disponível em: https://repositorio.insper.edu.br/handle/11224/4642. Acesso em: 8 jul. 2024.

STAEVIE, P. M. Um balanço das discussões sobre os impactos do agronegócio sobre a amazônia brasileira. **Revista Nera**, n. 42, p. 98–112, 2018. DOI: 10.47946/RNERA.V0I42.5684. Disponível em: https://doi.org/10.47946/rnera.v0i42.5684. Acesso em: 5 mai. 2024.

SZEKACS, A.; DARVAS, B. Comparative Aspects of Cry Toxin Usage in Insect Control. **Advanced Technologies for Managing Insect Pests**, p. 195–230, 1 out. 2013. Disponível em: <https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-007-4497-4_10>. Acesso em: 25 jun. 2024.

TABASHNIK, B. E. Genetics of resistance to Bacillus thuringiensis. **Annual Review of Entomology** 39, 47-79, 1994. doi: 10.1146/annurev.en.39.010194.000403

TAKAHASHI, M. et al. Accumulation of high levels of free amino acids in soybean seeds through integration of mutations conferring seed protein deficiency. **Planta**, v. 217, n. 4, p. 577–586, 1 ago. 2003. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12684787/>. Acesso em: 25 nov. 2024.

TANG, J.; RILEY, W. J. Finding Liebig's law of the minimum. **Ecological Applications**, v. 31, n. 8, p. e02458, 2021. DOI: 10.1002/EAP.2458. Disponível em: https://doi.org/10.1002/eap.2458. Acesso em: 15 jun. 2024.

TAY, W. T; SORIA, M. F.; WALSH, T. *et al*. A brave new world for an old world pest: Helicoverpa armigera (Lepidoptera: Noctuidae) in Brazil. **PLOS ONE**, v. 8, n. 11, p. e80134, 2013. DOI: 10.1371/journal.pone.0080134. Disponível em: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0080134. Acesso em: 5 mai. 2024.

TENGERDY, R. P.; SZAKÁCS, G. Perspectives in agrobiotechnology. **Journal of Biotechnology**, v. 66, n. 2–3, p. 91- 99, 1998. DOI: 10.1016/S0168-1656(98)00138-2. Disponível em: https://doi.org/10.1016/S0168-1656(98)00138-2. Acesso em: 2 mai. 2024.

TETTAMANTI, G.; CASARTELLI, M. Cell death during complete metamorphosis. **Philosophical Transactions of the Royal Society B**, v. 374, n.1783, 2019. DOI: 10.1098/RSTB.2019.0065. Disponível em: https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0065. Acesso em: 28 jun. 2024.

TISDELL, C. Sustainable development: differing perspectives of ecologists and economists, and relevance to LDCs. **World Development**, v. 16, n. 3, p. 373–384, 1988. DOI: 10.1016/0305-750X(88)90004-6. Disponível em: https://doi.org/10.1016/0305-750X(88)90004-6. Acesso em: 9 jul. 2024.

THOMAS, A. L.; COSTA, J. A. **Soja: manejo para alta produtividade de grãos**. Evangraf, 2010. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/255741>. Acesso em: 28 jun. 2024.

TODOROV, V.; MARINOVA, D. Modelling sustainability. **Mathematics and Computers in Simulation**, v. 81, n. 7, p. 1397–1408, 2011. DOI: 10.1016/j.matcom.2010.05.022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.matcom.2010.05.022. Acesso em: 9 jul. 2024.

transgenics, Cham: Springer, 2022. p.131–347. DOI:10.1007/978-981-19-2119-3_4. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-981-19-2119-3_4. Acesso em: 7 mai. 2024.

TORRES, M. [Site]. **Principais tipos de solo do estado do Pará**. Blog Geografia do Pará. Disponível em: https://geomaurotorres.blogspot.com/2009/06/principais-tipos-de-solos-do-estado-do.html. Acesso em: 7 nov. 2024.

VARGAS, G. A. **A economia da soja**: vantagens e desvantagens da transgenia no Brasil. 2013. 68 f. Monografia (Graduação em Ciências Econômicas) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2013.

VASCONCELOS, M.; ECKERT, H.; ARAHANA, V. *et al.* Molecular and phenotypic characterization of transgenic soybean expressing the Arabidopsis ferric chelate reductase gene, FRO2. **Planta**, v. 224, n. 5, p. 1116–1128, 2006. DOI: 10.1007/S00425-006-0293-1. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s00425-006-0293-1. Acesso em: 2 jul. 2024.

VERMA, M.; VERMA, S. K. **Textbook of Plant Physiology, Biochemistry and Biotechnology**. Editora S. Chand. Nova Deli. 2007.

VERTUAN, H. et al. Biomass degradation after harvest of genetically modified products compared to conventional counterparts. **Journal of Regulatory Science**, v. 11, n. 1, p. 1–17, 16 nov. 2023. Disponível em: <https://regsci-ojs-tamu.tdl.org/regsci/article/view/186>. Acesso em: 8 maio 2024.

VILLORIA, N.; GARRETT, R.; GOLLNOW, F. *et al*. Leakage does not fully offset soy supply-chain efforts to reduce deforestation in Brazil. **Nature Communications**, v. 13, n. 1, p. 1–10, 2022. DOI: 10.1038/s41467-022-33213-z. Disponível em: https://doi.org/10.1038/s41467-022-33213-z. Acesso em: 10 jul. 2024.

VOELCKEL, C.; SCHITTKO, U.; BALDWIN, I. T. Herbivore-induced ethylene burst reduces fitness costs of jasmonate- and oral secretion-induced defenses in Nicotiana attenuata. **Oecologia**, v. 127, n. 2, p. 274–280, 2001. DOI: 10.1007/s004420000581. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s004420000581. Acesso em: 8 maio. 2024.

WALSH, C. T.; TU, B. P.; TANG, Yi. Eight Kinetically stable but thermodynamically activated molecules that power cell metabolism. **Chemical reviews**, v. 118, n. 4, p. 1460–1494, 2018. DOI: 10.1021/acs.chemrev.7B00510. Disponível em: https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00510. Acesso em: 3 jul. 2024.

WANG, C.; LI, W.; KESSENICH, C. R. *et al*. Safety of the bacillus thuringiensis-derived Cry1A.105 protein: evidence that domain exchange preserves mode of action and safety. **Regulatory Toxicology and Pharmacology**, v. 99, p. 50–60, 2018. DOI: 10.1016/J.YRTPH.2018.09.003. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2018.09.003. Acesso em: 21 maio. 2024.

WANG, J.; MCCLEAN, P. E.; LEE, R. *et al*. Association mapping of iron deficiency chlorosis loci in soybean (Glycine max L. Merr.) advanced breeding lines. **Theoretical and Applied Genetics** v. 116, n. 6, p. 777–787, 2008. DOI:

10.1007/S00122-008-0710-X. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s00122-008-0710-x. Acesso em: 2 jul. 2024.

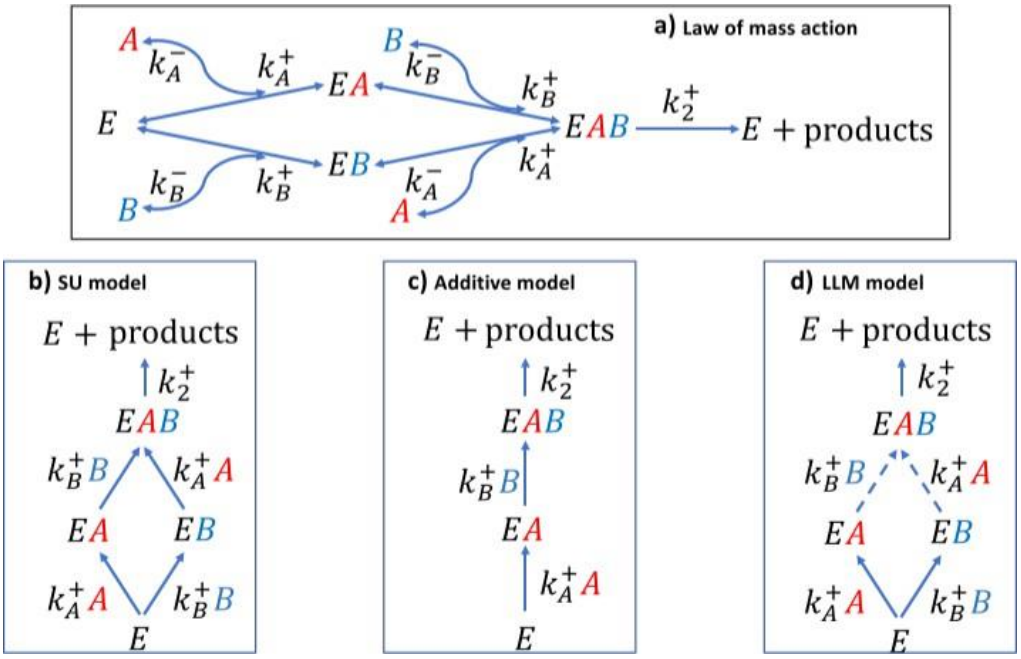
WEIHS, M.; SAYAGO, D.; TOURRAND, J. F. Dinâmica da fronteira agrícola do Mato Grosso e implicações para a saúde. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 31, n. 89, p. 323–338, 2017. DOI: 10.1590/S0103-40142017.31890024. Disponível em: https://www.scielo.br/j/ea/a/DhyCPcX6j9ypfThszpyzcdb/. Acesso em: 3 jul. 2024.

YIN, Robert K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**/Robert K. Yin; trad. Daniel Grassi - 2.ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.

ZHU, C.; NAQVI, S.; GOMEZ-GALERA, S. *et al.* Transgenic strategies for the nutritional enhancement of plants. **Trends in Plant Science**, v. 12, n. 12, p. 548–555, 2007. DOI: 10.1016/j.tplants.2007.09.007. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.tplants.2007.09.007. Acesso em: 9 jul. 2024.

ZIEGLER, H. R. S. **Sustentabilidade de Sistemas Agroflorestais (SAF) no semiárido cearense utilizando insumos locais, Fortaleza – CE**. 2013. 120 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013. Disponível em: http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/16080. Acesso em: 2 jul. 2024.

ANEXO A - Diagrama dos fluxos de massa das diferentes modelagens de produção de biomassa de acordo com Tang & Riley (2021)



Segundo os autores, a Figura deste anexo trata-se de; FIG. 1 (a) Esquema de E trabalhando em dois substratos complementares A e B para produzir produtos, por exemplo, biomassa, gases ou água. (b) Esquema para o modelo da unidade sintetizadora (SU). (c) Esquema para o modelo aditivo, e observamos que ele ignora o efeito da ordem de ligação em EAB devido à ligação de A e B a E. (d) Esquema para o modelo da lei do mínimo de Liebig (LLM), onde as linhas tracejadas indicam que o substrato associado é ilimitado. O modelo SU, o modelo aditivo e o modelo LLM são aproximações à lei da ação das massas. Os parâmetros de reação direta são designados com sobrescrito "+", enquanto os parâmetros de reação inversa são designados com sobrescrito "–". Os termos k representam constantes de taxa para cada reação em unidades apropriadas.

ANEXO B - Síntese de aminoácidos essenciais.

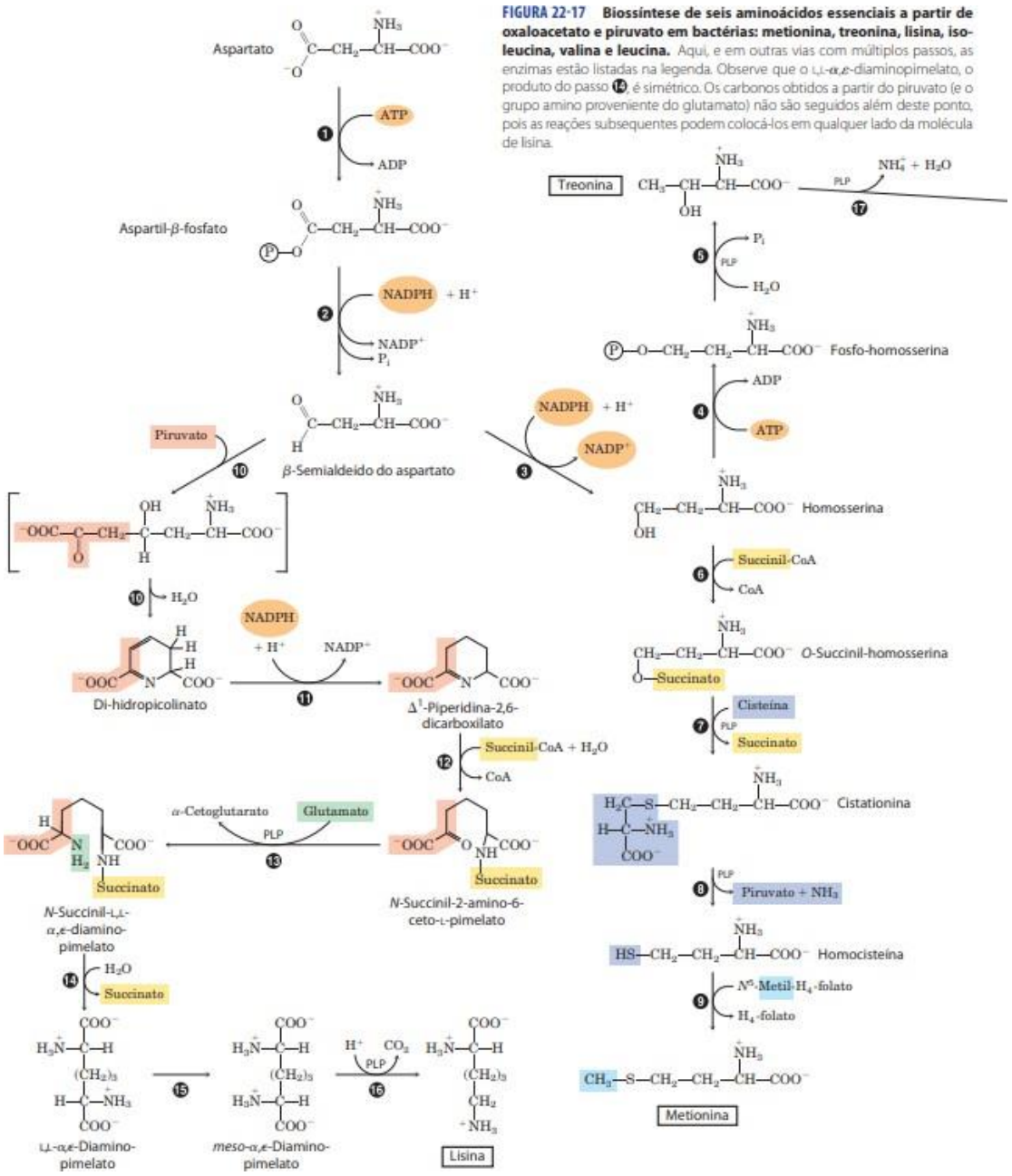


FIGURA 22-17 **Biossíntese de seis aminoácidos essenciais a partir de oxaloacetato e piruvato em bactérias: metionina, treonina, lisina, isoleucina, valina e leucina.** Aqui, e em outras vias com múltiplos passos, as enzimas estão listadas na legenda. Observe que o L,L-α,ε-diaminopimelato, o produto do passo ⓮, é simétrico. Os carbonos obtidos a partir do piruvato (e o grupo amino proveniente do glutamato) não são seguidos além deste ponto, pois as reações subsequentes podem colocá-los em qualquer lado da molécula de lisina.

Na imagem é possível observar as quantidades de moléculas de energia necessárias para a síntese determinados aminoácidos. Extraído de NELSON, D. L., COX, M. M. **Princípios de Bioquímica de Lehninger**. 6. Ed. Porto Alegre: ARTMED, 2014.