



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA – UFBA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECOLOGIA: TEORIA, APLICAÇÃO E
VALORES
MESTRADO EM ECOLOGIA: TEORIA, APLICAÇÃO E VALORES

**FERNANDA BEATRIZ DO
NASCIMENTO**

**A FALHA METABÓLICA NA AGRICULTURA BRASILEIRA:
O CASO DOS FERTILIZANTES SINTÉTICOS**

Salvador-BA

FERNANDA BEATRIZ DO NASCIMENTO

**A FALHA METABÓLICA NA AGRICULTURA BRASILEIRA:
O CASO DOS FERTILIZANTES SINTÉTICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia: Teoria, Aplicação e Valores, como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Ecologia: Teoria, Aplicação e Valores.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Dobrovolski.

Dados internacionais de catalogação-na-publicação
(SIBI/UFBA/Biblioteca Universitária Reitor Macedo Costa)

Nascimento, Fernanda Beatriz do.

A falha metabólica na agricultura brasileira: o caso dos fertilizantes sintéticos / Fernanda Beatriz do Nascimento. - 2024.

47 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Dobrovolski.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal da Bahia, Instituto de Biologia, Salvador, 2024.

1. Ecologia agrícola - Brasil. 2. Agricultura - Brasil. 3. Adubos e fertilizantes. 4. Solos - Conservação
5. Solo - Uso - Aspectos ambientais. 6. Sociometabolismo. 7. Intensificação ecológica. I. Dobrovolski,
Ricardo. II. Universidade Federal da Bahia. Instituto de Biologia. III. Título.

CDD - 630.27450981

CDU - 631.95(81)



**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECOLOGIA:
TEORIA, APLICAÇÃO E VALORES**

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA – INSTITUTO DE BIOLOGIA
Rua Barão de Jeremoabo, s/n. Ondina – Salvador – Bahia – CEP. 40.170-000



**ATA DA SESSÃO PÚBLICA DO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM ECOLOGIA: TEORIA, APLICAÇÃO E VALORES –
INSTITUTO DE BIOLOGIA – UFBA**

Título da Dissertação: “A falha metabólica na agricultura brasileira: o caso dos fertilizantes sintéticos”

Mestrando(a): **Fernanda Beatriz do Nascimento**

Orientador(a): **Ricardo Dobrovolski**

De acordo com o regimento geral da UFBA e com o regimento interno deste programa de pós-graduação, foram iniciados os trabalhos da Comissão Examinadora, composta pelo professor Dr. Ricardo Dobrovolski (Presidente), Prof. Dr. Eduardo Sá Barreto Cruz e o Prof. Dr. Eduardo Mariano Neto, às 14:00h do dia 20 de dezembro de 2024. A mestrandona fez a apresentação oral da dissertação durante 40 minutos. Após o encerramento das arguições, às 16:00 horas, a Comissão Examinadora pronunciou-se pela sua aprovação. Esta Ata será assinada pelos membros da Comissão Examinadora e deste Colegiado de curso, para compor o processo de emissão do diploma.

Salvador, 20 de dezembro de 2024.

COMISSÃO EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
gov.br RICARDO DOBROVOLSKI
Data: 23/12/2024 16:59:10-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Membro: Prof. Dr. Ricardo Dobrovolski

Documento assinado digitalmente
gov.br EDUARDO SA BARRETO CRUZ
Data: 23/12/2024 17:34:43-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Membro: Prof. Dr. Eduardo Sá Barreto Cruz

Documento assinado digitalmente
gov.br EDUARDO MARIANO NETO
Data: 04/01/2025 10:30:38-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Membro: Prof. Dr. Eduardo Mariano Neto

eu sou como eu sou
pronomé
pessoal intransferível
do homem que iniciei
na medida do impossível

eu sou eu sou
agora
sem grandes segredos dantes
sem novos segredos dentes
nesta hora

eu sou como eu sou

presente
desferrolhado indecente
feito um pedaço de mim
eu sou como eu sou
vidente
e vivo tranquilamente
todas as horas do fim..

Cogito - Torquato Neto

Aos meus pais, por todo o amor e apoio, dedico.

SUMÁRIO

| | |
|-----------------------------------|----|
| Agradecimentos..... | 6 |
| Resumo..... | 10 |
| Abstract..... | 11 |
| Introdução Geral..... | 12 |
| Introdução Específica..... | 19 |
| Métodos..... | 22 |
| Resultados..... | 24 |
| Discussão..... | 29 |
| Considerações Finais..... | 35 |
| Referências..... | 36 |

Agradecimentos

Agradeço à CAPES pela concessão da bolsa de mestrado pela concessão da bolsa de estudos que permitiu não só a realização deste trabalho como toda minha subsistência na Bahia.

Agradeço à Universidade Federal da Bahia e ao seu Programa de Pós-Graduação em Ecologia, Teoria, Aplicação e Valores, pelo ensino público, gratuito e de qualidade.

Agradeço ao meu orientador, Ricardo Dobrovolski. Durante os dois anos em que trabalhamos juntos, aprendi muito e espero continuar aprendendo. Agradeço pela parceria, paciência, compreensão e disponibilidade para ajudar e ensinar sempre.

Agradeço à banca examinadora por ter aceitado o convite para avaliar minha dissertação. A contribuição e as sugestões fornecidas foram fundamentais para aprimorar este trabalho.

Também gostaria de agradecer ao laboratório de Ecologia e Conservação, pelo acolhimento e suporte. Agradeço a todos os membros atuais e passados desse laboratório pelas trocas acadêmicas e pessoais, em especial a Roberta, Raimundo e Carla. Vocês foram essenciais para minha formação, compartilhamos diversos momentos difíceis, e momentos maravilhosos que me fizeram uma Ecóloga e uma pessoa melhor, as amizades que construímos certamente serão levadas para a vida.

Agradeço a Carol Birrer, por me ouvir nos momentos difíceis, por me incentivar em cada passo e por sempre me apoiar com tanto carinho e paciência. Sem você, eu ainda estaria perdida e com a dissertação toda fragmentada. Sua presença e suas palavras foram o impulso que me guiou e me fez acreditar que seria possível finalizar este trabalho.

Ao laboratório de Ecologia Espacial, em especial ao professor Bruno Vilela, por disponibilizar o notebook do laboratório, que foi fundamental para concluir minha dissertação e realizar a análise dos meus dados. Também agradeço ao meu amigo Umberto por sua disponibilidade em ajudar com dúvidas sobre a linguagem de programação R, sempre com muita tranquilidade e paciência.

Um agradecimento especial para meu amigo Endrick Lima, sempre disponível para ajudar, desde dúvidas sobre R até discussões sobre temas como Lenin, Zapatismo e Socialismo.

Agradeço às minhas queridas amigas, quase irmãs, Ana, Jane e Diana, que tornaram meus dois anos de mestrado e minha estadia em Salvador ainda mais especiais. Sou imensamente grata pelo cuidado, pelo carinho e até pelas puxadas de orelha que, em muitos momentos, foram mais do que merecidas. Não poderia ter sido melhor recepcionada na cidade, e vocês estão, sem dúvida, no meu coração para sempre.

Aos amigos do PPG ECOTAV, que tornaram os dias de trabalho mais leves com nossas conversas, desabafos, pausas para café e idas ao Tchellos, os desafios de estar fazendo um mestrado em outro Estado foram muito mais fáceis de enfrentar com vocês. Um agradecimento especial a, Lara, Priscila, Luiza, Ana Letícia, Jean, Adrielle, Milena, Henrique, Mailson, Maria Vitória, Rodrigo, Malu, Thalita e Cora.

Expresso minha gratidão ao professor Gabriel Barros, que foi meu coordenador durante o período de estágio, pela amizade que construímos.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação com quem tive o prazer de conviver e aprender durante esses anos, meu sincero agradecimento.

Por fim, aos meus pais, Francisca e Juraci, e meu avô Manoel e minha tia Rosa, obrigada pelo amor, suporte e incentivo de sempre.

A falha metabólica na agricultura brasileira

O Brasil é um, dominado por um modelo de produção destruidor. Ano após ano, o agronegócio bate recordes de safra de soja, milho e cana-de-açúcar, mas o que a propaganda não diz, é que ele é insustentável. Ele surgiu sobre terras indígenas, promoveu genocídios e ecocídios. Esse negócio só se sustenta economicamente com os subsídios bilionários do Estado, incentivos fiscais e crédito rural subsidiado, isenção fiscal, enquanto contribui apenas com 5% do PIB. Além disso, o agronegócio opera com uma enorme dependência de sementes transgênicas, agrotóxicos e fertilizantes sintéticos, que estão destruindo nossos solos, poluindo a água e tornando o país refém do mercado internacional. O modelo atual está cada vez mais insustentável: não é rentável sem subsídios, não fortalece a soberania alimentar e aprofunda a crise ambiental. Por que isso acontece? Porque o nosso sistema socioeconômico tem como base o lucro a qualquer custo.

Com a produção industrial e o comércio global, o capitalismo rompeu definitivamente com os ciclos locais dos nutrientes. Originalmente, esses eram retirados do solo e retornavam ao à mesma área em forma de matéria orgânica, permitindo ciclos locais sustentáveis de renovação da biota local. O uso intensivo necessário para satisfazer a demanda industrial faz com que uma grande quantidade de matéria seja transportada para áreas urbanas industriais de todo o mundo, sem retornar às regiões rurais originais, esgotando a fertilidade local da terra e forçando os produtores a buscar constantemente novas áreas para a produção, sendo essa uma das causas da constante expansão da fronteira agrícola e mazelas associadas como , a grilagem de terras e a expulsão de comunidades camponesas e indígenas. A lógica predatória da agricultura intensiva não é um fenômeno isolado – ela faz parte de um processo mais amplo de degradação ambiental impulsionado pelo capitalismo. Esse processo é explicado pela teoria da falha metabólica, que descreve a ruptura no metabolismo entre o homem e a natureza e entre a cidade e o campo. Inspirado na teoria marxista do sociometabolismo, o conceito refere-se à ruptura nos fluxos de matéria e energia entre a natureza e a sociedade humana, causada por sistemas produtivos que exploram os recursos naturais em uma velocidade maior do que a capacidade do meio ambiente de regenerá-los, criando um descompasso crescente entre o que a terra pode oferecer e o que a agricultura capitalista exige para manter seus lucros. A falha metabólica da agricultura brasileira é evidente na enorme dependência de fertilizantes sintéticos. Para manter a produtividade exigida pelo mercado global, despejam quantidades cada vez maiores de nitrogênio, fósforo e potássio nos solos –

mas sem que isso necessariamente aumente a produtividade agrícola no mesmo ritmo. Os dados mostram que, nos últimos anos, o uso de fertilizantes cresceu cerca de quatro vezes mais rápido do que a produtividade agrícola,. Esse processo não é apenas uma imposição do mercado, mas resultado de fatores históricos, tecnológicos e estruturais. Políticas agrícolas e subsídios públicos consolidaram a dependência dos produtores em pacotes tecnológicos baseados em fertilizantes sintéticos, agrotóxicos e sementes transgênicas, impulsionados pelo discurso da modernização agrícola da Revolução Verde. Além da perda de fertilidade natural do solo, com o tempo, os agricultores também perderam autonomia produtiva e conhecimento tradicional, tornando-se reféns de grandes corporações.

Marx já apontava que as contradições do capitalismo não podem ser resolvidas dentro do próprio sistema, e a crise ecológica é um reflexo disso. O modelo atual trata a natureza apenas como fonte de matéria-prima, explorando os recursos sem considerar seus limites de renovação. Para superar a falha metabólica, não basta reformar a agricultura – é preciso transformar o sistema como um todo, criando um novo metabolismo social, onde a produção e o consumo respeitem os ciclos naturais e garantam uma distribuição justa dos recursos. Experiências como a agroecologia em Cuba e o Programa Grãos para o Verde na China mostram que é possível restaurar solos degradados e garantir segurança alimentar sem depender da exploração desenfreada. Em Cuba, a redução no uso de fertilizantes sintéticos não comprometeu a produtividade, enquanto na China, milhões de hectares foram recuperados com reflorestamento e práticas sustentáveis. O que esses países têm em comum? Um modelo de produção que não coloca o lucro acima de tudo e que permite um planejamento voltado para o bem coletivo. Esses exemplos mostram que um outro caminho é possível – mas ele exige romper com a lógica predatória e construir uma agricultura baseada na sustentabilidade, na soberania alimentar e na justiça social.

Resumo

O conjunto de trocas materiais entre os seres humanos e a natureza não-humana é o sociometabolismo. Na sociedade capitalista, ocorre uma falha metabólica nos fluxos de matéria e energia os quais os ecossistemas dependem. A agricultura é uma atividade caracterizada por essa falha sendo a principal atividade humana em termos de impacto, inclusive sobre as condições e recursos dos quais depende, incluindo o solo. Este estudo testa a hipótese da falha metabólica que prevê que as taxas de crescimento do uso de fertilizantes sintéticos são maiores que as taxas de aumento da produtividade agrícola, evidenciando uma degradação da fertilidade do solo, que necessita cada vez mais de insumos para produzir a mesma quantidade de alimento. Nós coletamos dados sobre a quantidade de fertilizantes aplicados e a produtividade das principais culturas brasileiras, soja, milho e cana, culturas responsáveis por mais de 70% das lavouras brasileiras e que se destacam como as principais *commodities* de exportação do país. Nós testamos a diferença entre os coeficientes angulares das diferentes retas por meio da análise de covariância. As taxas de crescimento do uso de fertilizantes químicos foram quatro vezes maiores que as taxas de crescimento da produtividade agrícola em média. A falha metabólica da agricultura brasileira está degradando as condições locais das quais depende, reduzindo a produtividade e aumentando a dependência de insumos externos, tornando essa atividade cada vez menos sustentável. Esse resultado, no entanto, do ponto de vista do capital é interessante, pois torna a agricultura cada vez mais dependente de insumos externos, e portanto, um consumidor crescente de mercadorias. Financiamentos com juros reduzidos, seguro agrícola, repetidos perdões de dívidas e Subsídios públicos consolidaram a dependência dos produtores em pacotes tecnológicos baseados em fertilizantes sintéticos, agrotóxicos e sementes transgênicas. Para além dos nutrientes aqui avaliados, esperamos que o padrão se repita para outros insumos como, maquinários e agrotóxicos. Utilizar os princípios ecológicos na produção agrícola, como propõe a abordagem da intensificação ecológica, pode contribuir para reduzir esses danos. No entanto, uma mudança transformadora na agricultura é fundamental para a superação da falha metabólica, garantindo segurança alimentar e proteção do ambiente.

Palavras-chave: falha metabólica, Intensificação ecológica, Mudança transformadora, Sociometabolismo

Abstract

Sociometabolism refers to the set of material exchanges between humans and non-human nature. In capitalist societies, a metabolic rift disrupts the flows of matter and energy essential to ecosystems. Agriculture is a prime example of this disruption and represents the human activity with the greatest impact on the natural environment, including the very conditions and resources it depends on, such as soil. This study tests the metabolic rift hypothesis, which predicts that the growth rates of synthetic fertilizer use outpace the growth rates of agricultural productivity, indicating a degradation of soil fertility. As a result, increasing amounts of inputs are required to produce the same amount of food. We collected data on fertilizer application rates and the productivity of Brazil's main crops, soybeans, corn, and sugarcane, which together account for over 70% of the country's farmland and are leading export commodities.

We compared the slope coefficients of different growth trends using covariance analysis. On average, the growth rate of chemical fertilizer use was four times higher than the growth rate of agricultural productivity. Brazilian agriculture's metabolic rift is degrading the local conditions it relies on, decreasing productivity, and deepening dependence on external inputs, making the system increasingly unsustainable. However, from the perspective of capital, this outcome is advantageous, as it drives greater dependency on external inputs and, consequently, an expanding consumer market for commodities. Low-interest financing, agricultural insurance, repeated debt forgiveness, and public subsidies have entrenched farmers' reliance on technological packages based on synthetic fertilizers, pesticides, and genetically modified seeds.

Beyond the nutrients assessed here, we expect similar trends for other inputs, such as machinery and pesticides. Applying ecological principles to agricultural production, as proposed by the ecological intensification approach, can help mitigate these impacts. Nevertheless, a transformative change in agriculture is essential to overcoming the metabolic rift, ensuring food security, and protecting the environment.

Keywords: metabolic rift, ecological intensification, transformative change, sociometabolism

Introdução Geral

A degradação do solo é atualmente uma das maiores ameaças ambientais. Projeções indicam que, até 2050, cerca de 90% dos solos do planeta podem estar em risco, com a remoção estimada de 75 bilhões de toneladas de solo (FAO, 2022). Nesse cenário a capacidade produtiva agrícola é comprometida, principalmente a capacidade de atender às demandas alimentares crescentes e de preservar os recursos naturais essenciais (FAO, 2022) representando um risco para a segurança alimentar global e a realização dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), da ONU e intensificando ainda mais os impactos sobre ecossistemas e comunidades ao redor do mundo.

Devido à degradação da terra, o mundo está perdendo cerca de US\$44 trilhões de seu PIB agrícola (UNDP, 2022). Embora avanços tecnológicos e combinadas práticas de manejo tenham impulsionado os rendimentos de culturas básicas, as *commodities* como milho e soja estão sofrendo uma redução global da produtividade, estimada em 4% a 6%, um impacto ainda mais severo em regiões tropicais e subtropicais (OECD, 2023). Na América do Sul, desde 1961, a produtividade agrícola diminuiu em 21%, a seca resultou em uma redução de 2,6% na colheita de cereais de um ano para o outro, acompanhada por ondas de calor extremo (OECD, 2023). As mudanças na produtividade da terra estão profundamente ligadas às dinâmicas de uso e cobertura do solo, em grande parte, impulsionadas pelas atividades humanas, com a agricultura, em particular, sendo predominante responsável pela maior parte da alteração do uso da terra em todo o mundo e uma das principais motores da perda e degradação do solo em todo o planeta (Foley, 2011). O relatório sobre degradação e restauração da terra da UNCCD enfatiza que este é um problema global urgente que requer ação imediata e coordenada, uma vez que já afeta o bem-estar de 3,2 bilhões de pessoas, contribui para a extinção massiva de espécies e causa perdas econômicas superiores a 10% do PIB mundial. Apesar de o impacto ser severo, o relatório mostra que os benefícios de investir na restauração do solo, mitigando a degradação, superam amplamente os custos. Combater a degradação da terra também é um dos pontos fundamentais para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) até 2030 (UNCCD, 2024).

A degradação do solo causada por atividades humanas não é algo recente. Já no século XIX, o químico alemão Justus von Liebig, pioneiro na identificação dos elementos essenciais para a fertilidade das plantas — nitrogênio, fósforo e potássio (N,

P e K) —, observou, durante uma crise agrícola na Inglaterra, que a exportação em larga escala de alimentos e fibras do campo para as cidades, impulsionada pela organização social capitalista industrial, resultava em uma significativa redução da concentração de N, P e K nos solos, comprometendo sua fertilidade (Magdoff, 1998). A perda de nutrientes foi compensada, a partir do surgimento da indústria dos fertilizantes sintéticos, que passaram a ser amplamente utilizados na agricultura industrial, o que modificou profundamente o ciclo natural dos solos e consequentemente os padrões de troca material entre a sociedade e a natureza. Marx interpretou essas mudanças como uma 'falha metabólica', um conceito central na teoria do metabolismo social, que descreve a ruptura na ciclagem de nutrientes entre a cidade e o campo, uma alteração extrema na relação entre seres humanos e natureza, uma vez que, nas formas tradicionais de agricultura, os nutrientes eram reciclados de volta ao solo e nas práticas modernas, esses nutrientes passaram a ser transportados por longas distâncias, muitas vezes se acumulando como poluentes nos esgotos urbanos das primeiras cidades industriais. A falha metabólica foi uma das causas principais da acentuada perda de fertilidade do solo observada na primeira metade do século XIX e, ainda hoje, é responsável pelos impactos na qualidade e produtividade dos solos. (Foster, 2005).

A falha na ciclagem de nutrientes entre a cidade e o campo, revela o desequilíbrio profundo na relação entre seres humanos e natureza, causado pelas práticas modernas de agricultura associada à urbanização. A teoria da "falha metabólica", utiliza o entendimento do metabolismo no contexto da sociedade humana, ou seja, o sociometabolismo, para descrever as trocas materiais entre sociedade e ambiente, enfatizando como as rupturas nos ciclos naturais resultam em crises ambientais contemporâneas, exemplo da degradação do solo e o uso intensivo de recursos. Marx, portanto, expande o conceito de metabolismo para abranger o "sociometabolismo", que compreende os fluxos materiais e de energia entre sociedades e seus ambientes, assim como os fluxos internos que descrevem como a sociedade utiliza e distribui recursos e a interação com outros sistemas sociais. O sociometabolismo destaca como a composição, magnitude e padrões desses fluxos utilizados pelas sociedades humanas vão determinar os impactos sobre o ambiente (Haberl, 2019). A aplicação da ideia de metabolismo, nesse contexto, é o de trabalho humano como um processo metabólico, no qual os materiais brutos da natureza são transformados para adquirirem formas úteis aos seres humanos, que, diferentemente de outros animais sociais, transformam a natureza de maneira intencional e planejada por

meio do trabalho, devido à sua capacidade de autoconsciência. (Foster, 2013; Dobrovolski, 2012). A "falha metabólica", então, representa os desequilíbrios nas relações entre sociedade e natureza, exacerbados por práticas capitalistas que comprometem a estabilidade ecológica.

Ao focar nas trocas materiais entre sociedade e natureza e ao considerar a possibilidade de sua ruptura, a teoria abriu novas possibilidades de pesquisas sobre os impactos ecológicos do desenvolvimento econômico. A conexão direta entre a teoria da falha metabólica e a crítica do capitalismo na sociedade permitiu a aplicação dessa perspectiva teórica na análise das contradições em desenvolvimento do capitalismo em várias áreas. Essas áreas incluem desde os limites planetários e o metabolismo de carbono até questões como esgotamento do solo, produção de fertilizantes, manejo de incêndios florestais e ciclos hidrológicos (Foster, 2013) se revelando como uma ferramenta para compreender os desafios ambientais contemporâneos e as complexas interações entre sociedade e natureza. A teoria salienta que o capitalismo, ao impor suas necessidades de ampliação dos lucros, desestabiliza os ciclos naturais, conduzindo à degradação ambiental, como ilustrado pela agricultura inglesa e o uso de fertilizantes sintéticos.

A intensificação da agricultura moderna, que depende fortemente de pesticidas, fertilizantes e maquinários pesados para aumentar a produtividade das colheitas, geram impactos negativos significativos no solo (Foley, 2011). Na agricultura industrial moderna há uma tentativa de mitigação dos desafios provenientes dos impactos do solo, por meio do aumento de investimentos em pesticidas, fertilizantes, equipamentos mais potentes e irrigação mais frequente (Saito, 2021), o que contribui para que além da degradação do solo, o ciclo de nitrogênio (N) e fósforo (P) também seja perturbado muito além dos limites de estabilidade do sistema terrestre (Steffen et al, 2015). A introdução total de nitrogênio antropogênico aplicado ao sistema agrícola atualmente é de aproximadamente 190 Tg por ano, ultrapassando os limites planetários estabelecidos (FAO, 2022). Quanto ao fósforo (P), a taxa de aplicação de fertilizantes em terras agrícolas é atualmente de 17,5 Tg de P por ano, mas o uso está em aumento, e estimativas mais altas, de até 32,5 Tg de P por ano, foram relatadas em outros estudos. Portanto, os limites globais de fósforo também estão sendo excedidos. (Richardson, 2023). Para repor os nutrientes perdidos durante a produção e tentar restaurar a fertilidade original, a produtividade das safras do agronegócio depende significativamente do uso de pesticidas, sementes geneticamente modificadas e

fertilizantes sintéticos incluindo produtos químicos como o nitrato. (Dobrovolski, 2012).

O Brasil é um dos principais consumidores globais de fertilizantes, representando cerca de 8% do consumo mundial, mas ainda dependente de importações devido à insuficiência da produção interna para suprir a demanda doméstica (Brasil, 2021). No ranking mundial de importação de 2020, o Brasil foi o terceiro maior importador de fertilizantes nitrogenados e potássicos e o maior importador de fertilizantes fosfatados (FAO, 2022), o que evidencia uma alta dependência externa. Essa dependência deixa a economia brasileira, vulnerável às flutuações do mercado internacional de fertilizantes, como o que ocorreu durante a guerra Rússia-Ucrânia que impactou o fornecimento de fertilizantes para o agronegócio brasileiro, já que os dois países em guerra estão entre os maiores fornecedores do insumo (Brasil, 2023). Nos últimos dez anos, o país importou cerca de 80% do nitrogênio, 60% do fósforo e mais de 90% do potássio consumidos (FAO, 2022).

O avanço na degradação da terra é particularmente relevante para países cuja economia depende fortemente do setor agrícola, como é o caso do Brasil. Cerca de 63% do valor das exportações brasileiras são representadas pelas commodities agrícolas (UNCTAD, 2019). O Brasil é o quarto maior produtor mundial de grãos, incluindo arroz, cevada, soja, milho e trigo, com uma participação de 7,8% na produção total mundial (Brasil, 2022). O país é o segundo maior exportador de grãos do mundo, com 19% da exportação global, totalizando US\$ 37 bilhões em 2020 (Embrapa, 2020). A dependência econômica nas *commodities* agrícolas é ainda mais destacada pelo recente Plano Safra 2023/2024 que ofereceu um financiamento recorde de R\$ 363 bilhões para o agronegócio, um aumento significativo de 27% em relação ao ano anterior (Conab, 2023). O rápido crescimento das terras agrícolas, especialmente entre 1970 e 2006, coincidiu com a diminuição na mão de obra agrícola e o aumento considerável no uso de tratores. Essa rápida expansão é destacada pelo aumento da área ocupada pela agricultura no Brasil, que saltou de 19 milhões de hectares em 1985 para 55 milhões de hectares em 2020. Desse total, 36 milhões de hectares são dedicados à soja, ocupando sozinha 4,3% do território nacional. O Cerrado, que hoje abriga quase metade (42%) da agricultura brasileira, viu sua vegetação original ser reduzida a apenas 20% e, entre 1985 e 2020, essa área cresceu 464%. Em segundo lugar, vem a Mata Atlântica, que representa 34% da área de agricultura, seguida por Amazônia e Pampa, com 11% cada.

O Pampa é o bioma com a maior parcela do território ocupado pela agricultura mapeada (31%) (MapBiomas, 2021).

A pressão sobre essas áreas continuará a aumentar no próximo século. A Amazônia, representando metade da área do país e com uma população relativamente baixa, é o foco da atenção internacional para conservação, mas também enfrenta uma pressão crescente devido à expansão agrícola. Enquanto isso, regiões menos protegidas como a Mata Atlântica e o Cerrado, já estão intensamente impactadas pela agricultura.

O objetivo deste estudo é testar empiricamente a falha metabólica na agricultura brasileira e quantificar a sua intensidade, propondo com um método claro de fazê-lo. Vamos testar se a taxa de crescimento da produtividade das principais culturas agrícolas no Brasil é maior que a taxa de aumento do uso de fertilizantes. A hipótese central deste estudo é que o coeficiente angular da relação entre o aumento da produtividade ao longo do tempo é menor do que o coeficiente angular de aumento dos fertilizantes. Este coeficiente representa a diferença entre a taxa de crescimento do uso de fertilizantes e a taxa de crescimento da produção agrícola. Realizamos uma análise comparativa entre essas duas taxas de crescimento ao longo dos anos, evidenciando a crescente dependência do solo em relação aos fertilizantes, uma vez que é necessário adicionar quantidades cada vez maiores para manter a produtividade. A análise comparativa das taxas de crescimento mostra que, ao longo do tempo, o uso de fertilizantes cresce mais rapidamente do que a produtividade agrícola, sugerindo que o solo está atingindo um ponto de exaustão.

Referências Bibliográficas

BETANCOURT, M. The effect of Cuban agroecology in mitigating the metabolic rift: a quantitative approach to Latin American food production. **Global Environmental Change**, v. 63, 2020. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2020.102075.

BORRELLI, P. et al. Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015-2070). **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 117, n. 36, p. 21994-22001, 2020.

BRANDOLINI, F. et al. Modelling the impact of historic landscape change on soil erosion and degradation. **Scientific Reports**, v. 13, p. 4949, 2023. DOI: 10.1038/s41598-023-31334-z.

BRASIL. Secretaria Especial de Assuntos Estratégicos. **Plano Nacional de Fertilizantes 2050: uma estratégia para os fertilizantes no Brasil**. Brasília: SAE, 2021.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (Conab). Plano Safra destina R\$ 364,22 bilhões para apoiar produção agropecuária nacional. **Conab**, 27 jun. 2023. Disponível em:

<https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/5050-plano-safra-destina-r-364-22-bilhoes-para-apoiar-producao-agropecuaria-nacional>. Acesso em: 15 ago. 2024.

DECAËNS, T. et al. The values of soil animals for conservation biology. **European Journal of Soil Biology**, v. 42, p. S23-S38, 2006.

DOBROVOLSKI, R. et al. Agricultural expansion and the fate of global conservation priorities. **Biodiversity and Conservation**, v. 20, p. 2445-2459, 2011.

DOBROVOLSKI, R. et al. Agricultural Expansion Can Menace Brazilian Protected Areas During the 21st Century. **Natureza & Conservação**, v. 9, p. 208-213, 2011.

DOBROVOLSKI, R. Marx's ecology and the understanding of land cover change. **Monthly Review**, v. 64, n. 1, p. 31-39, 2012.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (Embrapa). Brasil é o quarto maior produtor de grãos e o maior exportador de carne bovina do mundo, diz estudo. **Embrapa**, 01 jun. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/62619259/brasil-e-o-quarto-maior-produtor-de-graos-e-o-maior-exportador-de-carne-bovina-do-mundo-diz-estudo>. Acesso em: 15 ago. 2024.

ESTADÃO AGRO. Plano Safra: como funciona o financiamento do agronegócio de 2023/2024. **Estadão Agro**, 06 set. 2023. Disponível em: <https://agro.estadao.com.br/summit-agro/plano-safra-como-funciona-o-financiamento-do-agronegocio-de-2023-2024>. Acesso em: 15 ago. 2024.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO); INTERGOVERNMENTAL TECHNICAL PANEL ON SOILS (ITPS). **Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report**. Rome: FAO, 2015.

FOSTER, J. B. **A ecologia de Marx: materialismo e natureza**. 1. ed. Rio de Janeiro: Civilização Brasileira, 2005. 418 p.

FOSTER, J. B. Marx and the Rift in the Universal Metabolism of Nature. **Monthly Review**, v. 65, n. 7, p. 1-19, 2013.

FOSTER, J. B. Marx and the Rift in the Universal Metabolism of Nature. **Monthly Review**, v. 65, n. 7, p. 1-19, 2013.

HABERL, H. et al. Contributions of sociometabolic research to sustainability science. **Nature Sustainability**, v. 2, n. 3, p. 173-184, 2019.

JÓNSSON, J. Ö. G.; DAVÍÐSDÓTTIR, B. Classification and valuation of soil ecosystem services. **Agricultural Systems**, v. 145, p. 24-38, 2016.

MAGDOFF, F.; BUTTEL, F. H.; FOSTER, J. B. Hungry Profit: Agriculture, Food and Ecology. **Journal of Agricultural and Environmental Ethics**, v. 11, p. 252-254, 1999. DOI: 10.1023/A:1009506824671.

MAPBIOMAS BRASIL. Fact Sheet Agricultura Silvicultura 2021. **MapBiomass Brasil**, 2021. Disponível em:
https://brasil.mapbiomas.org/wp-content/uploads/sites/4/2023/12/Fact-Sheet_Agricultura_Silvicultura_2021.pdf. Acesso em: 15 ago. 2024.

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT (MEA). **Ecosystem and Human Well-being: A Framework for Assessment**. Island Press, 2005.

ORGANIZATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT (OECD). **Agricultural Policy Monitoring and Evaluation 2023**. Paris: OECD Publishing, 2023. Disponível em: <https://www.oecd.org/agriculture>. Acesso em: 21 nov. 2024.

PRĀVĀLIE, R. Exploring the multiple land degradation pathways across the planet. **Earth-Science Reviews**, v. 220, 2021. DOI: 10.1016/j.earscirev.2021.103689.

RICHARDSON, K. et al. Earth beyond six of nine planetary boundaries. **Science Advances**, v. 9, 2023. DOI: 10.1126/sciadv.adh2458.

SÁ BARRETO, E. Fundamentos para a crítica ecológica do capitalismo no Livro I de O capital (ou: esse não é mais um texto sobre ruptura metabólica). In: **Para que leiam O Capital: interpretações sobre o Livro I**. São Paulo: Usina Editorial, 2021.

SACHER, W. The "Metabolic Rift" of John Bellamy Foster: What contributions for an ecomarxist theory? **Sustainable Human Development**, 2022.

SAITO, K. O ecossocialismo de Karl Marx: capitalismo, natureza e a crítica inacabada à economia política. São Paulo: **Boitempo**, 2021.

STEFFEN, W. et al. Planetary boundaries: guiding human development on a changing planet. **Science**, v. 347, p. 736, 2015.

UNITED NATIONS CONVENTION TO COMBAT DESERTIFICATION (UNCCD).

The Global Land Outlook, second edition. Bonn: UNCCD, 2022.

UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME (UNDP). Losing the Ground Beneath Our Feet. **UNDP**, 16 maio 2022. Disponível em:

<https://stories.undp.org/losing-the-ground-beneath-our-feet>. Acesso em: 15 ago. 2024.

Título: A falha metabólica na agricultura brasileira: o caso dos fertilizantes sintéticos

A ser submetido para: *Global Change Biology*

Introdução

Nos últimos 10 mil anos, durante o Holoceno, a Terra manteve uma relativa estabilidade climática, caracterizada por variações menos extremas de temperatura e ciclos biogeoquímicos, favorecendo o desenvolvimento das sociedades humanas. No entanto, essa estabilidade não foi homogênea, e diversas civilizações enfrentaram colapsos associados a mudanças ambientais severas. A crescente exploração dos recursos naturais, impulsionada por demandas econômicas, têm acelerado a degradação ambiental em escala global. Esse cenário é evidenciado pelo agravamento das mudanças climáticas, a perda acelerada de biodiversidade, a acidificação dos oceanos e crises hídricas cada vez mais frequentes (Richardson, 2023). A agricultura desempenha um papel central na amplificação da crise, sendo uma das principais atividades humanas responsáveis por alterar processos críticos que garantem a estabilidade ambiental, seja pela conversão de florestas em áreas cultiváveis, pela emissão de gases de efeito estufa, ou pelo uso excessivo de fertilizantes e água doce, pressionando processos planetários essenciais (IPCC, 2019). Inicialmente desenvolvida para atender às necessidades básicas de subsistência, a agricultura evoluiu para um modelo intensivo de apropriação e degradação de recursos naturais, moldado por interesses econômicos e produtivistas. Essa relação intrínseca entre agricultura e crise ambiental pode ser entendida a partir do sociometabolismo, já que a análise da agricultura, sendo uma das atividades metabólicas essenciais para o sustento humano, revela de forma clara as falhas desse sistema.

Para sintetizar a relação dos seres humanos com o restante do planeta, a abordagem sociometabólica proporciona uma abordagem sistêmica que conecta a análise da crise ambiental contemporânea com a crítica ao crescimento econômico ilimitado em um mundo de recursos finitos levando a uma "falha metabólica" (Dobrovolski, 2012). Essa perspectiva examina as interações entre sociedade e natureza como entidades complexas que coevoluem (Harbel, 2019) e ajuda a entender a dependência das sociedades modernas dos fluxos materiais e energéticos e a necessidade de compatibilizá-los com os limites da biosfera para garantir a sustentabilidade (Saito, 2021).

Um aspecto importante da falha metabólica está na separação entre cidade e campo. Nessa separação, as áreas urbanas têm grande densidade populacional e nos campos há o esvaziamento, levando a grande concentração de nutrientes nos esgotos e lixos dos centros urbanos, além de as cidades abrigarem as fábricas que processam os produtos provenientes do campo, contribuindo para a maior concentração de nutrientes nas áreas urbanas, uma vez que não são devolvidos ao solo das áreas rurais de onde foram retirados enquanto a falta de reciclagem de esterco animal e resíduos humanos polui os centros urbanos (Dobrovolski, 2012). Marx analisou a separação entre cidade e campo como um processo inerente ao desenvolvimento do modo de produção capitalista, resultado da divisão social do trabalho e da concentração da propriedade da terra. No capitalismo, a produção agrícola é subordinada à lógica do mercado, e a terra deixa de ser um bem comum para se tornar mercadoria, levando ao deslocamento das populações rurais para os centros urbanos em busca de trabalho nas fábricas. Esse deslocamento foi intensificado pela expropriação camponesa, como ocorreu historicamente com os cercamentos na Inglaterra, que transformaram terras comunais em propriedades privadas voltadas para a produção agrícola em larga escala. Esse processo não apenas criou uma classe de trabalhadores urbanos dependentes do salário, mas também aprofundou a falha metabólica entre sociedade e natureza. Assim, a divisão entre cidade e campo não foi um casual, mas uma necessidade estrutural do capitalismo, que reorganizou o espaço para maximizar a acumulação de capital.

Embora o progresso técnico tenha permitido avanços na agricultura, ele se dá às custas da exploração intensiva do solo e do trabalhador e longe de ser um mecanismo neutro de aprimoramento das condições produtivas, ele é moldado pelas relações sociais e econômicas que estruturam a sociedade capitalista. Cada aumento temporário de produtividade é acompanhado pelo esgotamento gradual das fontes duradouras de fertilidade do solo (Marx, 2014). Esse problema ambiental não acontece pela ausência de tecnologia ou conhecimento científico que possibilitem um uso sustentável do solo, mas sim pois resulta da lógica da agricultura capitalista em larga escala, que visa explorar ao máximo as forças naturais para obter lucros crescentes, priorizando o enriquecimento acelerado dos proprietários de terras e das grandes empresas transnacionais do setor agrário (SAITO, 2021).

Considerando as cadeias produtivas, a agricultura chega a representar no contexto brasileiro, a falha metabólica se manifesta de forma significativa no consumo de fertilizantes e na relação entre produtividade agrícola e a degradação dos solos. O

Brasil é um dos maiores consumidores mundiais de fertilizantes sintéticos, e estima-se que anualmente haja um déficit entre 25 e 35 kg ha⁻¹ de N + P₂O₅ + K₂O, indicando uma gradual exaustão dos estoques desses nutrientes no solo (Lopes & Guilherme, 2007). A concentração dos fluxos materiais nas cidades, sem o retorno adequado dos resíduos orgânicos ao campo, não é resultado de uma falha técnica, mas da organização da produção orientada pela valorização do capital. O desequilíbrio metabólico é intensificado pela expansão da produção agrícola voltada para o mercado global de commodities, em especial soja e milho, utilizados tanto para alimentação quanto para a produção de agrocombustíveis, como o biodiesel. O Brasil, é o maior exportador mundial de soja, e tem uma significativa produção de milho, que são culturas intensivas em nutrientes (Imaflora, 2022). Assim como a soja e o milho, o Brasil tem um papel significativo no cultivo da cana-de-açúcar, despontando como maior produtor e exportador mundial de açúcar, e o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo. No contexto global, a cana-de-açúcar é um dos principais insumos para a produção de etanol, posicionando o país como o segundo maior produtor no mercado de agrocombustíveis. O Brasil utiliza a cana como uma fonte alternativa de energia, desde 1970 com a política do Proálcool, que visava reduzir a dependência do petróleo. (Conab, 2023)

A busca por novos mercados, como o de biocombustíveis, intensificou ainda mais a pressão sobre os ecossistemas naturais, resultando em uma maior destruição da vegetação nativa, como observado na Amazônia. A conversão de terras para o cultivo de soja e outras culturas para biocombustíveis gera uma cadeia de desmatamento e deslocamento de atividades agropecuárias, agravando ainda mais a ruptura metabólica entre sociedade e natureza ao promover uma exploração insustentável dos recursos naturais (Liu, 2014). O fenômeno da falha metabólica não se limita apenas ao fluxo desigual de nutrientes entre cidade e campo, mas também se estende ao impacto ecológico global causado pela demanda insaciável por produtos agrícolas e biocombustíveis, que alteram os ciclos naturais e ameaçam a estabilidade ecológica do planeta.

O foco marxista sobre o metabolismo social e o ciclo de nutrientes do solo, quando analisado à luz da ciência ecológica, demonstra uma notável afinidade. Na esfera da ecologia, os organismos vivos, por meio de suas interações, obtêm nutrientes e energia, seja consumindo outros organismos ou realizando fotossíntese e absorvendo nutrientes do solo. Este processo contribui para a cadeia trófica, culminando na

reciclagem de nutrientes de volta ao seu ponto de origem, contribuindo para o equilíbrio do ecossistema. Exemplificando tais interações em nível de comunidade, pode-se afirmar que elas podem ocorrer de maneira direta – como seria o caso das relações entre espécies de predador-presa e de simbiose – e de maneira indireta, quando uma espécie modifica o ambiente comum à outra (LEWONTIN & LEVINS, 1985). À medida que as sociedades humanas evoluem, especialmente com o avanço do capitalismo, as interações entre humanos e natureza tornam-se mais intensas e a alteração na natureza do metabolismo entre os seres humanos e o ecossistema, emerge como a essência dos desafios ecológicos contemporâneos. Tendo como resultado, o que Karl Marx chamou de “uma falha irreparável no processo interdependente do metabolismo social” que tornou-se hoje uma rede inter-relacionada de *fallhas globais* (Angus, 2016).

Neste estudo, testamos a hipótese da falha metabólica ao compararmos a taxa de crescimento do uso de fertilizantes sintéticos e a taxa de crescimento da produtividade agrícola. Nossa hipótese é que a taxa de crescimento dos fertilizantes será maior que a produtividade agrícola.

Métodos

Dados

Nós obtivemos os dados sobre produtividade agrícola de duas fontes públicas:, IBGE e Conab (<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras>). Os dados levantados cobrem o período de 1985 a 2020. Nesse estudo, utilizamos, soja, milho e cana-de-açúcar para testar a falha metabólica, uma vez que essas três culturas representam a maior área plantada no Brasil, (Imaflora, 2022). Exceto para cana-de-açúcar disponível a partir do ano de 1987. Além disso, esses dados foram coletados e divulgados pelo IBGE entre 1987 até 2007 e a partir de 2008 pela CONAB, o que diminui a precisão dos dados. Aproximadamente 73% do total de fertilizantes minerais no país são destinados para atender essas culturas (Brasil, 2021). Especificamente, milho e soja são as principais culturas geradoras das exportações nacionais, registrando aproximadamente 113 milhões de toneladas e 126 milhões de toneladas, respectivamente, de acordo com dados do Governo Federal em 2023. A área total de agricultura mapeada no Brasil passou de 19 milhões de hectares em 1985 para 55 milhões de hectares em 2020, sendo 36 milhões de hectares apenas de soja, 9

milhões de cana-de-açúcar e 3 milhões de milho, um total de 576.643 bilhões do valor da produção (MapBiomas, 2021).

Nesta pesquisa foram utilizados os dados de produtividade média em quilos por hectare. A produtividade agrícola é a relação entre a produção rural e os insumos utilizados no processo específico de agricultura. Para realizar o cálculo de produtividade, deve-se considerar a massa total da produção dividida pela área plantada. Foram utilizados dados das séries históricas de estoques públicos por produto e englobam os estoques de todas as culturas que já estiveram, ou, estão, em poder da União.

Nós buscamos os dados de fertilizantes aplicados no site da FAO (Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura), a organização disponibiliza dados a partir de 1961, porém foram utilizados dados a partir de 1985 para que pudesse ser feita a comparação com os dados de produtividade. Foram utilizados os três principais macronutrientes necessários para o desenvolvimento das plantas, Nitrogênio, Fósforo e Potássio, o conjunto NPK, os mais utilizados na agricultura brasileira. Nós transformamos os dados dividindo o valor de produtividade ou quantidade de fertilizante pelo valor de 1985, de forma que o valor inicial era igual a 1 para todas as variáveis. As padronizações permitiram as comparações diretas das mudanças nas diferentes variáveis ao longo do tempo.

Análise

Nós utilizamos inicialmente regressões lineares para quantificar a taxa de aumento da produtividade e do consumo de fertilizantes ao longo do tempo, a qual é representada pelo coeficiente angular da regressão (β_1). Nessas regressões, o tempo, em anos, é a variável independente (x) e a taxa de crescimento é a variável dependente (y). O ano inicial foi definido como tempo zero. Essas regressões tiveram o valor do intercepto (β_0) ajustado para 1, uma vez que todas as variáveis foram padronizadas para o esse valor inicial (x = 0). Assim, o modelo geral utilizado foi:

$$y = 1 + \beta_1 \cdot x + \epsilon$$

Calculamos também a média entre as três culturas e a média entre os três fertilizantes com o objetivo de fazer uma comparação geral do crescimento da

produtividade das culturas com a quantidade de fertilizantes utilizada. Por fim, para todas essas comparações, realizamos uma análise de covariância voltada para a diferença dos coeficientes angulares, para a par, a fim de testar a hipótese nula de que esses coeficientes são iguais.

A falha metabólica foi calculada como a razão entre o crescimento dos fertilizantes e o crescimento da produtividade média das culturas. Caso o aumento da produtividade acompanhe o valor de produtividade, esse valor será próximo de um. Caso a produtividade esteja aumentando mais que o uso de fertilizantes, esse valor será menor que 1. Finalmente, se o uso de fertilizantes está crescendo em uma taxa superior à produtividade, esse valor será maior que 1. São esse valores maiores que um que esperamos no caso da falha metabólica, pois eles indicariam um esgotamento crescente do solo, que nesse caso, estaria necessitando proporcionalmente de cada vez mais fertilizantes na mesma área para garantir a mesma produtividade. Assim, esse valor é uma medida direta do nível da falha metabólica e assim o definimos como “razão da falha metabólica” (metabolic rift ratio). Todas as análises estatísticas foram executadas no software R (Versão 4.1.2) (R Core Team, 2021).

Resultados

Durante o período analisado, a área destinada à agricultura no Brasil passou de 19 milhões de hectares em 1985 para 55 milhões de hectares em 2020, o que representa um aumento de 219%. A quase totalidade (96%) é de lavouras de grãos e cana, que triplicaram em 38 anos. Em 1985, ocupavam 18,3 milhões de hectares; em 2022, sua área equivale a 7% do território nacional, ou 58,7 milhões de hectares. A soja representa 35 milhões de hectares de crescimento são do avanço da soja que, sozinha, aumentou a área cultivada quatro vezes, sem deixar de mencionar a segunda safra de milho, que é cultivada após a colheita da soja (MapBiomas, 2023).

Em 1985, a produtividade da soja no Brasil era de 1.369 kg por hectare, enquanto a do milho era de 1.565 kg por hectare, já a produtividade da cana-de-açúcar, era de 62,31 kg por hectare em 1987. Em 2020, a produtividade da soja aumentou para 3.526 kg por hectare, a do milho para 5.686 kg por hectare, e a da cana-de-açúcar para 75.965 kg por hectare. Em 1985, a área plantada de soja era de 9.644,4 mil hectares e a

de milho, 12.623,5 mil hectares. A área plantada de soja expandiu para 39.531,2 mil hectares até o ano de 2020, enquanto a área de milho diminuiu para 4.348,4 mil hectares. A área plantada de cana-de-açúcar aumentou para 8.616,1 mil hectares (Conab, 2022).

Ao longo do período estudado, a produtividade da agricultura brasileira aumentou em média 247,6% para as culturas de soja, milho e cana-de-açúcar (Tabela 1; Figura 1). A soja cresceu 257,56% em 35 anos, e o milho, 363,32%. A cana-de-açúcar, apesar de flutuações, apresentou um crescimento médio de 121,91% em relação ao valor inicial.

A taxa de crescimento de fertilizantes foi de 640% em média, sendo o nitrogênio do fertilizante com maior crescimento (700%). O milho foi a cultura de maior crescimento (tabela X). O uso de fertilizantes sintéticos aumentou 640,33% no período, com o nitrogênio crescendo cerca de 700%, o fósforo 547% e o potássio 674% (Tabela 2; Figura 1). Os coeficientes angulares médios para o crescimento da produtividade e a aplicação de fertilizantes foram calculados neste estudo. Em média, a produtividade das culturas de soja, milho e cana-de-açúcar aumentou 3,71% por ano. Por outro lado, a aplicação média de fertilizantes, incluindo nitrogênio, fósforo e potássio, mostrou um crescimento de 14,80% unidades por ano. As diferenças médias na taxa de aumento do uso de fertilizantes em relação à produtividade dos produtos agrícolas foram de aproximadamente 3,99 vezes ($F = 0,0446$; $p < 0,05$; Tabela 2). Isso indica que o crescimento na aplicação de fertilizantes foi aproximadamente quatro vezes maior do que o crescimento na produtividade das culturas, mostrando o tamanho da falha metabólica no solo brasileiro.

Culturas Agrícolas

TABELA 1 Resumo do crescimento da produtividade da agricultura brasileira ao longo de um período de 35 anos (1985-2020), considerando as culturas de soja, milho e cana-de-açúcar. A média do crescimento relativo à produtividade das três culturas foi de 247,6%.

| Cultura | Taxa de Crescimento Relativo à Produtividade |
|----------------|---|
| Soja | 257.56% |
| Milho | 363.32% |
| Cana | 121.91% |
| Média | 247.6% |

Uso de Fertilizantes

TABELA 2 resumo do crescimento relativo ao uso de fertilizantes sintéticos no período de 1985 a 2020, A média do crescimento relativo ao uso de fertilizantes sintéticos para os três nutrientes foi de 640.33%.

| Nutriente | Taxa de Crescimento Relativo ao Uso de Fertilizante |
|------------------|--|
| Nitrogênio | 700.00% |
| Fósforo | 547.00% |
| Potássio | 674.00% |
| Média | 640.33% |

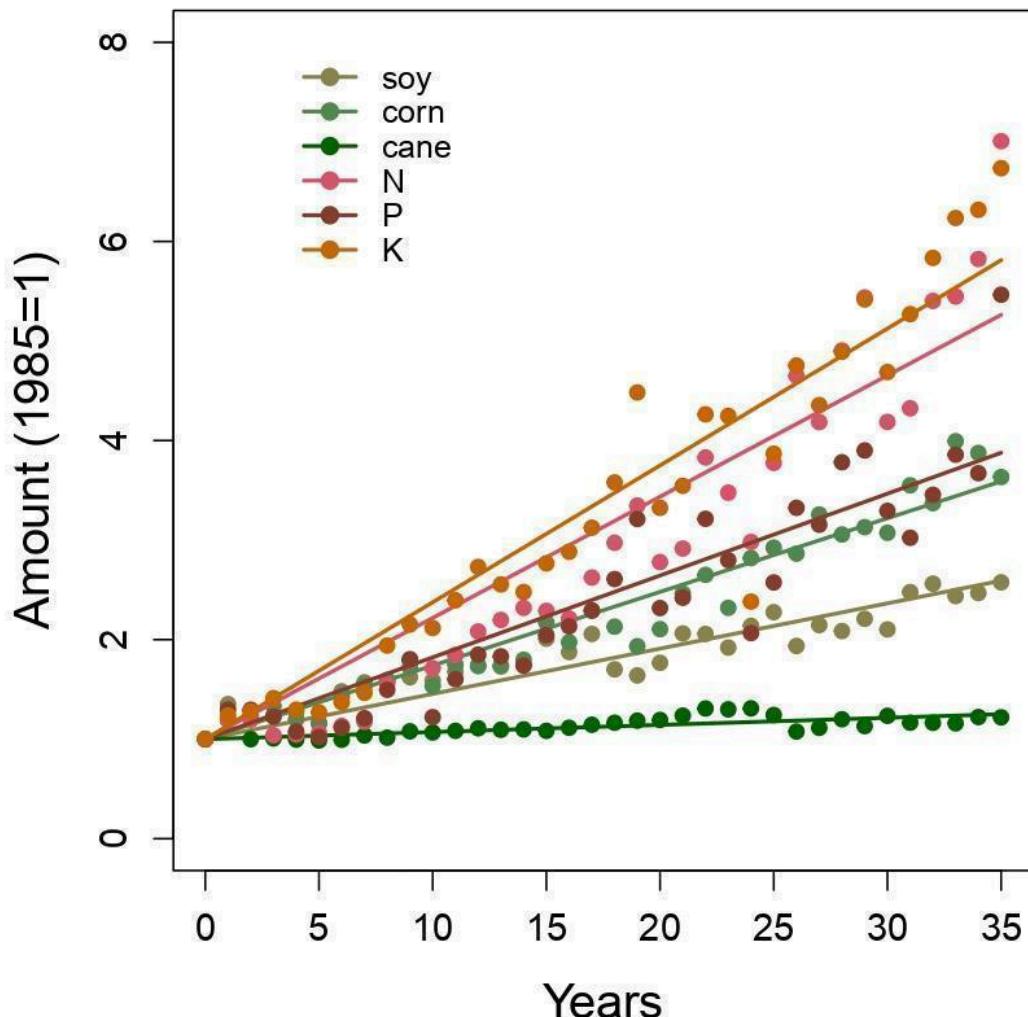


Figura 1 Tendência crescente no uso de nitrogênio, fósforo e potássio em comparação com a produtividade de soja, milho e cana, de 1985 até 2020.

Os resultados mostraram coeficientes significativos para todas as variáveis, indicando a influência do tempo nas taxas de crescimento. Observou-se um aumento anual médio de 4,55% na produtividade da soja, 7,40% no milho e 0,72% na cana. Já para os fertilizantes sintéticos foram observados um aumento de 12,18% para nitrogênio, 8,22% para fósforo e 13,75% para potássio. A qualidade de ajuste dos modelos foi avaliada por meio do R-quadrado múltiplo e do R-quadrado ajustado. Os valores obtidos indicaram um bom ajuste dos modelos aos dados, explicando aproximadamente 96,81% da variabilidade na soja, 98,23% no milho, 85,79% na cana,

95,13% no nitrogênio, 93,80% no fósforo e 96,93% no potássio (Tabela 3). Na tabela 3 abaixo, estão os valores analisados em cada variável.

Tabela 3 com os valores do coeficiente angular, R quadrado, valor de P e erro padrão das análises das variáveis em relação ao aumento por ano realizados em um modelo de regressão pela origem, onde a variável resposta é ajustada subtraindo o primeiro ano.

| Variável | Coeficiente em % | R2 | Valor P | Erro Padrão |
|------------|------------------|---------|---------|-------------|
| Soja | 4,55% | 96.81%. | p<0.001 | 0.1705 |
| Milho | 7,40% | 98.23% | p<0.001 | 0.2051 |
| Cana | 0,72% | 85.79% | p<0.001 | 0.0620 |
| Nitrogênio | 12,18% | 95.13% | p<0.001 | 0.5689 |
| Fósforo | 8,22% | 93.80% | p<0.001 | 0.4362 |
| Potássio | 13,75% | 96.93% | p<0.001 | 0.5050 |

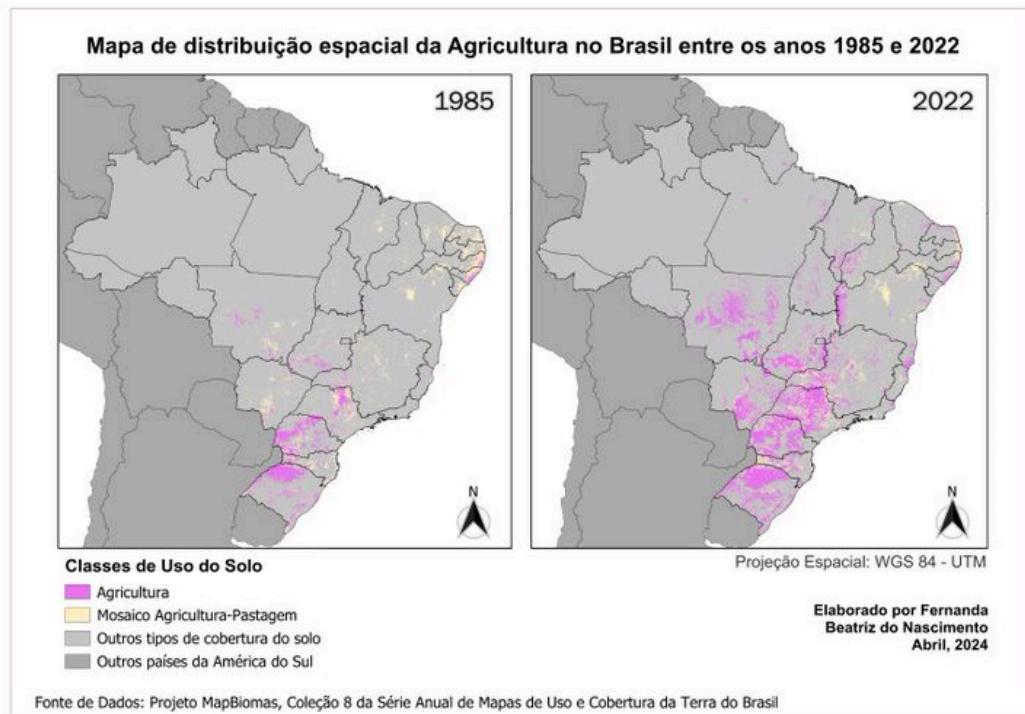


Figura 4 Mudanças no uso/cobertura da terra no Brasil nas últimas décadas, abrangendo os anos de 1985 a 2022, o mapa mostra a expansão da agricultura (fonte de dados: MapBiomas – Coleção 8 da Série de Mapas de Cobertura e Uso da Terra no Brasil, acessado em 27/04/2024 através do link: <http://mapbiomas.org/>)

Discussão

1. Resultado geral
2. Importância para o Brasil
3. O impacto sobre a expansão agrícola
4. Intensificação ecológica como alternativa
5. Mudança transformativa

Neste estudo, identificamos empiricamente a falha metabólica na agricultura brasileira, com base na análise da mudança da produtividade e do uso de fertilizantes sintéticos ao longo do tempo no Brasil. As taxas de crescimento do uso de nitrogênio, fósforo e potássio, os principais fertilizantes sintéticos da agricultura, foram, em média, 4 vezes maiores do que as taxas de crescimento da produtividade das três principais culturas agrícolas do Brasil, a soja, milho e cana-de-açúcar. Assim, temos não apenas um indicativo qualitativo da falha metabólica no principal país agroexportador do mundo, mas também temos um indicador quantitativo desse processo, que pode ser comparado a outros países e outros períodos do tempo.

O entendimento desse processo no Brasil é fundamental, considerando o papel que a agricultura cumpre no país. O Brasil é particularmente vulnerável a esses efeitos, dada sua longa ligação com a agricultura e a significativa parcela da biodiversidade global presente em seu território (Dobrovolski, 2012)

Não se limitando aos impactos diretos na agricultura e na produção agrícola, a falha metabólica afeta também a soberania brasileira, uma vez que o país enfrenta uma produção interna insuficiente, necessitando da importação desses insumos. No levantamento mundial de importação de 2020, o Brasil ocupou a terceira posição entre os maiores importadores de fertilizantes nitrogenados e potássicos, ficando atrás apenas da Índia e dos Estados Unidos, respectivamente, destacando-se como o maior importador global de fertilizantes fosfatados (Ipea, 2023). Nos últimos dez anos, o país

importou cerca de 80% do nitrogênio, 60% do fósforo e mais de 90% do potássio consumidos (FAO, 2022). Essa dependência deixa a economia nacional, que é fortemente apoiada no agronegócio, vulnerável às flutuações do mercado internacional de fertilizantes (Brasil, 2023).

O financiamento ao agronegócio no Brasil é amplamente sustentado por recursos públicos, principalmente através do Plano Safra, com créditos majoritariamente direcionados à produção de commodities para exportação e, a cada ano, os recursos disponíveis aumentam, com um incremento de cerca de 10% em relação ao financiamento anterior (Brasil, 2024). Desde 2003/04, o crédito rural aumentou significativamente, passando de R\$ 32,5 bilhões para um recorde de R\$ 400,59 bilhões em 2024/25, dos quais apenas 21% foram destinados à agricultura familiar (Brasil, 2003; Brasil, 2024). Esse crescimento reflete a intensificação do apoio ao agronegócio empresarial, apesar de o setor contribuir com apenas 5,4% do PIB nacional (Brasil, 2023). Além dos créditos rurais, o Estado oferece incentivos fiscais e investimentos em tecnologia para o agronegócio, práticas consideradas "subsídios perversos" (Myers, 2004), embora inicialmente essas práticas tenham o objetivo de promover o setor, na realidade acabam intensificando os problemas ambientais e sociais, já que ao investir mais em tecnologia e insumos para aumentar a produtividade, aprofunda a degradação do solo. O aumento no uso de tecnologias, maquinários pesados, e insumos químicos para sustentar altos níveis de produtividade gera um ciclo contraproducente: quanto mais se investe para manter uma lucratividade elevada, mais o solo se deteriora, exigindo ainda maiores investimentos para reparar os danos acumulados (Gordon, 2015). Os bancos brasileiros, liderados pelo Banco do Brasil, desempenham uma atuação primária no financiamento ao agronegócio, destinando entre 2016 e 2023 cerca de 127 bilhões de dólares a empresas com histórico de violações socioambientais, o que representa 41% dos financiamentos globais para esses setores (Forest & Finance, 2024). Esse capital alimenta um modelo voltado à exportação, focado em grandes propriedades e monoculturas de rápida lucratividade. Tal modelo impacta diretamente a estrutura ambiental e social, intensificando a concentração de terras, ampliando o desemprego no campo, promovendo a violência contra camponeses e populações tradicionais, além de reduzir a produção de alimentos para o mercado interno e facilitar a evasão de lucros, diminuindo o capital para investimentos locais e sustentáveis, o que reforça a subordinação econômica do país, que está estruturado para servir aos interesses do capital internacional. (Merlino, 2021). Esse processo se torna ainda mais evidente com a

participação de fundos de investimento e fundos de pensão estrangeiros na aquisição de terras e empresas agroindustriais que reforçam a lógica do agronegócio voltado para exportação, deslocando a produção de alimentos do abastecimento interno para atender a demanda global. Como consequência, há um fortalecimento da concentração de terras e do poder econômico e político das grandes corporações do setor, que passam a ditar as regras do mercado e das políticas públicas.

Além do financiamento público e da influência do capital financeiro, a isenção de impostos para exportadores, consolidada pela Lei Kandir, criada no governo FHC, aprofunda esse cenário ao reduzir a arrecadação dos estados e municípios, favorecendo ainda mais os grandes empresários do agronegócio e da mineração. (Fapespa, 2017). A falha metabólica no Brasil, portanto, vai além de um desequilíbrio ambiental; e reflete um sistema econômico projetado para perpetuar a dependência externa, a concentração de riqueza e a expropriação dos recursos naturais em benefício de poucos.

Os impactos da falha metabólica no Brasil não se limitam a questões econômicas, o uso crescente de fertilizantes gera impactos ecológicos significativos, como a mineralização e a degradação da estrutura do solo. A eutrofização de corpos d'água, causada pelo escoamento de nutrientes como nitrogênio e fósforo, exemplifica esses danos, assim como a perda de biodiversidade do solo, pois fertilizantes químicos reduzem a diversidade de microrganismos e invertebrados essenciais à saúde do ecossistema (Gliessman, 1998). O uso excessivo de fertilizantes também pode provocar salinização em terras irrigadas, resultando em perdas econômicas e áreas aráveis degradadas (Gliessman, 1998; Foley, 2005). A diminuição da produção em certas áreas ao longo do tempo, causada pela degradação do solo, também contribui para levar à expansão agrícola para novas fronteiras (Dobrovolski, 2012), como o que ocorreu na região do Matopiba (Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia), onde a expansão foi motivada pela necessidade de manter e aumentar a produção em áreas menos exploradas, em resposta aos desafios enfrentados no Sul e Centro-Oeste, que tem uma agricultura consolidada, mas que sofre com o aumento dos custos, a escassez de terras e a degradação do solo (Brasil, 2021; Ipea, 2016; Dias, 2016). A migração para o Matopiba possibilitou um aumento expressivo na produção, especialmente de soja, mas com uma desaceleração na produtividade, indicando que a simples expansão da área cultivada pode não sustentar o crescimento a longo prazo (Ipea, 2016; Dias, 2016).

Movida pela busca incessante de maximização dos lucros, a expansão agrícola agrava o desmatamento ao avançar sobre áreas de vegetação nativa, ameaçando

a biodiversidade e a integridade dos ecossistemas locais. A vulnerabilidade ambiental do país manifesta-se na sobrecarga dos solos, esgotamento hídrico e perda de biodiversidade, elementos primordiais para a fertilidade e produtividade agrícola a longo prazo. Esse ciclo compromete a segurança alimentar e hídrica, agravando vulnerabilidades sociais e ambientais, especialmente nas fronteiras agrícolas e em biomas como o Cerrado, a Amazônia e a Caatinga. No Cerrado, a conversão de áreas de vegetação nativa para a agricultura intensifica os impactos ambientais, acelerando o desmatamento e ampliando a pressão sobre a biodiversidade local (MapBiomas, 2024). Na Caatinga, prevê-se que, até 2060, cerca de 99% das formações vegetais possam perder espécies devido ao aumento da aridez e das temperaturas (Moura, 2023), enquanto estimativas indicam que até 33% das espécies neotropicais correm risco de extinção (Antonelli, 2021). Na Mata Atlântica, verifica-se um declínio alarmante na abundância de espécies endêmicas, que estão sendo gradualmente substituídas por espécies generalistas (Lima, 2020). Já na Amazônia, observa-se uma redução significativa na precipitação sazonal em áreas de produção de commodities, efeito menos expressivo em assentamentos rurais (Maeda, 2021). Os impactos são ainda mais intensificados pela crescente demanda por materiais biológicos, como madeira e resíduos orgânicos, que impulsionam a expansão agrícola para fins como geração de energia, produção de biocombustíveis e insumos industriais. Práticas voltadas não apenas para o aumento da produção, mas que também têm contribuído para o declínio da biodiversidade (Zabel, 2019).

É importante uma nova abordagem para a produção de alimentos, que leve em consideração tanto a necessidade de garantir a segurança alimentar global quanto a proteção do meio ambiente. A expansão da agricultura, especialmente em ecossistemas sensíveis como as florestas tropicais, deve ser interrompida para preservar a biodiversidade e mitigar as mudanças climáticas. Durante a COP26, o Brasil, junto a mais 109 países, comprometeu-se a alcançar o desmatamento zero até 2030, reconhecendo que essa meta é crucial para garantir a segurança alimentar, proteger a biodiversidade e enfrentar os desafios climáticos. A meta de "desmatamento zero" busca interromper completamente a destruição da vegetação nativa, garantindo a preservação das florestas existentes e evitando que novas áreas sejam desmatadas para a agricultura, urbanização ou exploração de recursos naturais. (Brasil, 2024).

À medida que o capitalismo demanda mais produção, a meta de desmatamento zero pode ser comprometida, especialmente com a expansão da produção de

biocombustíveis. A produção de biocombustíveis intensifica a pressão sobre as terras, competindo com áreas destinadas à produção de alimentos (Magdoff, 2008). Embora se apresente como alternativa para aliviar a crise energética e reduzir emissões de gases de efeito estufa, a produção de biocombustíveis exige grandes extensões de terra e recursos hídricos, competindo diretamente com a agricultura e contribuindo para desmatamento, erosão do solo e poluição das águas (Liu, 2014). O aumento do consumo de carne a nível global eleva a demanda por soja e cana-de-açúcar, amplamente usadas na alimentação animal, intensificando ainda mais a pressão sobre o uso do solo (Tilman, 2014). No Brasil, a produção de bioetanol, sobretudo a partir da cana-de-açúcar, concorre com a agricultura por terras férteis, resultando em desmatamento e degradação ambiental (Liu, 2014). O país é atualmente o segundo maior produtor global de biocombustíveis (OECD, 2021), e projeções indicam que a demanda continuará a crescer até 2030, impulsionando ainda mais o uso de etanol e biodiesel (OECD, 2021).

Para evitar a necessidade de novas expansões e alcançar o objetivo do desmatamento zero até 2030, é indispensável mitigar a falha metabólica da agricultura atual. Isso inclui aumentar a eficiência dos recursos agrícolas, fechando as lacunas de produtividade nas terras já cultivadas e adotando práticas avançadas de manejo do solo, conservação da água e redução de insumos agroquímicos (Foley, 2011). Nesse sentido, intensificar os benefícios da natureza por meio da chamada “intensificação ecológica”, favorecendo, por exemplo, a polinização, o controle de pragas e a qualidade do solo a partir do ecossistemas naturais é um caminho necessário. No entanto, essas e outras soluções passam por uma nova relação com o ambiente.

A intensificação ecológica tem sido apresentada como alternativa para aumentar a produtividade na mesma área com menor impacto ambiental, com a proposta de transformar os agricultores em gestores não apenas da produção, mas dos ecossistemas como um todo, utilizando princípios ecológicos para desenvolver sistemas de produção mais sustentáveis (Godfray, 2010; Griffon, 2013), um processo de reconciliação entre os produtores e a terra, em um movimento denominado recampesinização, permitindo que os agricultores recuperem sua autonomia produtiva e sua relação direta com o ambiente. (Rosset et al., 2011). Essa recampesinização é importante porque, na agricultura capitalista, os agricultores tornam-se meros operadores de um ciclo produtivo que não controlam, sujeitos à lógica de um agronegócio voltado para exportação e dominado por grandes corporações e fundos de investimento. Esse modelo impõe um trabalho

alienado, no qual a relação entre o agricultor e a terra se torna mediada por interesses externos, limitando sua autonomia e reduzindo-o a uma peça na engrenagem de um sistema que busca apenas maximizar lucros.

Além dessa visão integrada sobre a relação com a terra e com o próprio trabalho, onde o conhecimento tradicional dos agricultores também desempenha um papel central sendo incorporado a novos modelos produtivos em um processo de troca entre saberes locais e científicos, a intensificação ecológica utiliza a biodiversidade funcional para complementar ou substituir insumos sintéticos, aproveitando, por exemplo, a polinização que pode melhorar a produtividade agrícola ao se manterem habitats seminaturais favoráveis à biodiversidade e aos serviços ecossistêmicos. (Klein, 2019). A intensificação agroecológica, ao contrário da intensificação convencional, pode aumentar a produção sem comprometer a biodiversidade, especialmente em pequenos sistemas agrícolas tropicais. (Tscharntke *et al*, 2012) A melhoria da estrutura do solo e a retenção de água, podem ser alcançadas por práticas como a lavoura conservacionista, o uso de culturas de cobertura e a diversificação na rotação de culturas. O plantio direto, que minimiza o revolvimento do solo, preserva sua estrutura e capacidade de retenção de umidade, enquanto as culturas de cobertura, como as leguminosas, promovem a fixação natural de nitrogênio, substituindo fertilizantes sintéticos.

Apesar da intensificação ecológica ser uma proposta que questiona o modelo vigente de agricultura mais sustentável, ela por si só não é capaz de promover uma mudança mais profunda e sistemática. Para enfrentar os desafios resultantes da agricultura industrial é importante implementar não apenas práticas de manejo sustentáveis, mas também promover uma mudança mais profunda nos sistemas agrícolas e alimentares globais. Além da intensificação ecológica, o IPBES propôs a mudança transformadora como uma reorganização essencial em todo o sistema (IPBES, 2019), abordando não apenas práticas ecológicas, mas também a necessidade de reformas econômicas, políticas e sociais, como a eliminação de subsídios prejudiciais e a reestruturação dos sistemas econômicos. Essa transição implica ações urgentes, como a adoção rápida de energias limpas, a conservação e restauração de ecossistemas e a transformação das cadeias de suprimento. Para tal, cinco impulsionadores são apontados: incentivos à responsabilidade ambiental, integração setorial, ações preventivas, gestão para resiliência social e ecológica, e o fortalecimento de leis e políticas ambientais. (Diaz, 2019). Contudo, é importante ressaltar que o IPBES ainda

tenta, de certa forma, reconciliar interesses contraditórios, ao proporem mudanças profundas dentro do sistema atual, ao mesmo tempo em que continuam a promover soluções que reforçam a lógica de mercado. Embora essas iniciativas representam um passo significativo, elas não questionam de fato as estruturas de poder que perpetuam a crise ecológica e social que enfrentamos. De fato, essas abordagens, embora úteis em alguns aspectos, não são suficientes para superar os desafios profundos impostos pelo sistema capitalista global. Para alcançar um equilíbrio duradouro entre seres humanos e natureza, é necessário adotar um novo paradigma, que coloque a sustentabilidade e o bem-estar coletivo no centro das ações, ao invés da maximização do lucro, portanto, a mudança transformadora deve ser mais do que uma mudança nas práticas; ela deve ser uma mudança no próprio sistema que governa essas práticas.

Como ocorre em qualquer outra atividade econômica na sociedade capitalista, a agricultura está orientada para a obtenção de lucro, sobrepondo-se à sustentabilidade ambiental. Na agricultura, as terras mais produtivas geram maiores rendimentos com os mesmos meios de produção e força de trabalho. Na teoria clássica, o retorno sobre o capital investido nas propriedades da terra, derivado do monopólio da terra e deduzido da mais-valia total, é denominado *renda da terra*. Marx, ao analisar esse conceito com base nas teorias de renda diferencial de James Anderson e David Ricardo, aponta que a renda diferencial se manifesta na diferença de valor pago ao proprietário da terra, resultante dos diferentes lucros obtidos a partir da mesma atividade (Singer, 1982). Essa busca pelo lucro na agricultura capitalista incentiva um ciclo intensivo de exploração do solo, onde os proprietários das terras podem obter maiores ganhos financeiros sem aumentar diretamente o trabalho ou os recursos de produção. Para maximizar os rendimentos, o solo é intensivamente explorado, porém, a produtividade intensiva exige que o solo receba uma reposição contínua de nutrientes através de fertilizantes químicos. Com o tempo, o uso excessivo de insumos resulta em um desgaste do solo, que se torna cada vez mais dependente de fertilizantes externos, comprometendo sua capacidade de regeneração natural. Nossos resultados sobre o uso de fertilizantes no Brasil ilustra isso, revelando que a aplicação de fertilizantes cresceu quase quatro vezes mais do que a produtividade de culturas como soja, milho e cana-de-açúcar, indicando que a terra não consegue mais sustentar a produção sem reposição artificial intensa. Esse uso excessivo de fertilizantes representa um desgaste que vai além dos ganhos de produtividade, evidenciando que o solo está sendo pressionado até seu limite de sustentação. Como resultado, as atividades agrícolas e de extração sob o regime

capitalista podem ser descritas como a busca de renda diferencial, juntamente com a necessidade de escapar dos solos empobrecidos e dos recursos esgotados afetados pela falha metabólica. (Dobrovolski, 2012).

Marx, ao analisar as bases metabólicas da falha do capitalismo, afirmava que as contradições intrínsecas desse sistema não podem ser resolvidas dentro dele, ressaltando a necessidade de um novo modelo de produção. Para superar a crise ecológica, é preciso superar o modo de produção vigente, centrado no crescimento econômico e no lucro acima de tudo. Nesse modelo, a natureza é fonte de matéria-prima sendo explorado os recursos naturais e ecossistemas sem considerar seus limites de renovação. A proposta de uma mudança radical, sugere que precisamos de um "novo metabolismo social," onde o ciclo de produção e consumo respeite os ritmos naturais e distribua os recursos de forma justa, reduzindo as desigualdades e minimizando o impacto ambiental (Foster, 2011). Quando a natureza e seus recursos são bens comuns a todos, e geridos coletivamente em vez de apenas instrumentos de lucro, a transformação estrutural acontece. Nesse modelo, práticas econômicas fundamentam-se em colaboração e responsabilidade ambiental, e o acesso e o uso de recursos como terra, água e ar passam a ser compartilhados, evitando a concentração de seu controle nas mãos de poucos, algo que o modelo capitalista, com suas estruturas atuais, não realiza.

Um exemplo desse tipo de abordagem é visto na agroecologia em Cuba (2020), onde foi observada uma notável dissociação entre o uso de fertilizantes e a produtividade em comparação com outros países estudados. Mesmo com uma redução considerável no uso de fertilizantes sintéticos, Cuba conseguiu maximizar o rendimento de milho e feijão (Bittencourt, 2020). Outro exemplo ocorreu no Planalto de Loess na China (Yu *et al.*, 2020), historicamente marcado pela degradação severa do solo, o Planalto sofreu consequências significativas, como a redução da produtividade agrícola e o aumento da pobreza em comunidades locais. Em resposta, o governo chinês lançou, no final dos anos 1990, o “Programa Grãos para o Verde” (GFGP), visando mitigar esses impactos, convertendo terras agrícolas em áreas de vegetação natural para conter a erosão e melhorar a retenção de água. O programa recuperou aproximadamente 16.000 km² de terras, entre 2000 e 2010, a cobertura vegetal aumentou, com terras agrícolas diminuindo 28,3% e pastagens e florestas expandindo 12,4% e 5%, respectivamente, enquanto o índice de vegetação aumentou anualmente em 1,06%. Este exemplo fortalece o progresso da China no Objetivo de Desenvolvimento Sustentável da ONU, alinhando-se à Década da Restauração de Ecossistemas (2021-2030). O sucesso de

iniciativas como o Programa Grãos para o Verde (GFGP) na China, junto à experiência de Cuba, na restauração de solos, sugere um processo de restauração metabólica, onde os nutrientes do solo e a matéria orgânica são preservados e mantidos na terra, em vez de serem esgotados. Ambos os países, socialistas com um planejamento que não prioriza o lucro empresarial e tem forte influência estatal no planejamento de na execução, e marcados por revoluções que moldaram suas estruturas sociais e políticas, utilizam um modo de produção diferente do capitalista, o que lhes permite adotar abordagens mais coletivas e planejadas na gestão dos recursos naturais. Isso não só fortalece os ecossistemas locais, mas também oferece um modelo valioso para práticas agrícolas sustentáveis em regiões ao redor do mundo.

Considerações Finais

Nós testamos empiricamente a falha metabólica na agricultura brasileira. Encontramos que a taxa de crescimento de fertilizantes sintéticos é maior que o aumento da produtividade agrícola ao longo do tempo, em média 4 vezes. As práticas agrícolas intensivas estão profundamente enraizadas em um modelo de produção que prioriza ganhos de curto prazo, em detrimento de sistemas agrícolas mais sustentáveis, muitas vezes, negligenciando as consequências a longo prazo para o meio ambiente, se colocando como a principal atividade humana em termos de impacto e majoritariamente responsável pelo agravamento dessa falha. O Brasil é destacado como sendo um dos principais consumidores globais de fertilizantes, dependente de importações em decorrência da falta de indústria interna, o que torna ainda mais problemático a existência da falha metabólica e da dependência dos fertilizantes na agricultura nacional. A dependência crescente desses insumos no país sugere a perda da fertilidade natural do solo, que já não consegue se regenerar de forma eficiente, apontando para a degradação promovida pelo processo da falha metabólica. A evidência de que a agricultura brasileira, uma das maiores do mundo, sofre com a falha metabólica demonstra a necessidade de buscarmos alternativas. Como alternativa apontamos a intensificação ecológica para promover uma agricultura menos dependente de insumos químicos, no entanto, reconhecemos que, além dessa abordagem, é fundamental considerar uma transformação estrutural mais profunda, mais do que ajustes dentro do modelo vigente, é preciso questionar as bases que sustentam esse sistema. A lógica produtiva atual subordina os ciclos naturais às exigências do mercado, promovendo

degradação ambiental e concentração de riqueza. Nesse sentido, uma alternativa real exige a construção de um modelo agrícola que rompa com a lógica da mercantilização da natureza e reposicione a produção como um processo orientado para a soberania alimentar, a justiça social e a regeneração dos ecossistemas. Junto com a intensificação ecológica, foi discutida uma mudança transformadora que propõe a reorganização do sistema agrícola, integrando não apenas inovação tecnológica, mas fatores econômicos, culturais e sociais. Nossa estudo, portanto, identifica e analisa uma importante questão na agricultura brasileira, destacando a urgência de mudanças para mitigar os danos provocados pela agricultura industrial. Ao abordar a relação entre o uso de fertilizantes e a produtividade agrícola, esperamos que nossos achados, aliados às discussões anteriormente levantadas, abram espaço para mais discussões sobre o futuro das práticas agrícolas adotadas no Brasil.

Referências

- ANTONELLI, Alexandre. The rise and fall of Neotropical biodiversity. *Botanical Journal of the Linnean Society*, v. 199, n. 1, p. 8–24, maio 2022. DOI: <https://doi.org/10.1093/botlinnean/boab061>.
- ANGUS, Ian. *Facing the Anthropocene: Fossil Capitalism and the Crisis of the Earth System*. New York: Monthly Review Press, 2016.
- BETANCOURT, M. The effect of Cuban agroecology in mitigating the metabolic rift: a quantitative approach to Latin American food production. *Global Environmental Change*, v. 63, p. 102075, 2020. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2020.102075.
- BRASIL. Presidente anuncia Plano Safra 2023/2024. *Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*, 16 de julho de 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/presidente-anuncia-plano-safra-2023-2024>. Acesso em: 16 de julho de 2024.
- BRASIL. Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). Produção de

cana-de-açúcar na safra 2023/24 chega a 713,2 milhões de toneladas, a maior da série histórica. CONAB, 2023. Disponível em:

<https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/5489-producao-de-cana-de-acucar-na-safra-2023-24-chega-a-713-2-milhoes-de-toneladas-a-maior-da-serie-historica>. Acesso em: 25 nov. 2024.

BRASIL. Secretaria de Comércio Exterior. *COMEX STAT: exportação e importação geral*. Brasília: Secex, 2022. Disponível em: <http://comexstat.mdic.gov.br/pt/home>. Acesso em: 18 dez. 2023.

BRASIL. Secretaria Especial de Assuntos Estratégicos. *Plano Nacional de Fertilizantes 2050: uma estratégia para os fertilizantes no Brasil*. Brasília: SAE, 2021.

BRASIL. *Plano Agrícola e Pecuário 2003/2004*. Disponível em:

<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/politica-agricola/todas-publicacoes-de-politica-agricola/plano-agricola-pecuario/plano-agricola-e-pecuario-2003-2004.pdf>. Acesso em: 30 out. 2024.

BRASIL. *Governo Federal lança Plano Safra 2024/2025 com R\$ 400,59 bilhões para agricultura empresarial*. Recuperado de:

<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/governo-federal-lanca-plano-safra-24-25-com-r-400-59-bilhoes-para-agricultura-empresarial>.

BRASIL. *Balanço do Plano Safra da Agricultura Familiar 2024/2025: programa é lançado em mais quatro estados*. Disponível em:

<https://www.gov.br/mda/pt-br/noticias/2024/09/balanco-plano-safra-da-agricultura-familiar-2024-2025-programa-e-lancado-em-mais-quatro-estados#:~:text=A%20governadora%20F%C3%A1tima%20Bezerra%2C%20presente,modalidades%20de%20acesso%20ao%20cr%C3%A9dito>. Acesso em: 30 out. 2024.

BÜSCHER, B.; FLETCHER, R. *The conservation revolution: Radical ideas for saving nature beyond the Anthropocene*. Verso, 2020.

CLARK, Brett; FOSTER, John Bellamy; LONGO, Stefano B. *Metabolic Rifts and the*

Ecological Crisis. In: VIDAL, Matt et al. *The Oxford Handbook of Karl Marx*. Oxford: Oxford Handbooks, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780190695545.013.38>. Acesso em: 17 jun. 2024.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. *Acompanhamento da safra brasileira*, v. 6 – Safra 2019/20, n. 1 – Primeiro levantamento, Brasília, 2019. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>. Acesso em: 14 abr. 2024.

DÍAZ, Sandra et al. Pervasive human-driven decline of life on Earth points to the need for transformative change. *Science*, v. 366, p. eaax3100, 2019. DOI: 10.1126/science.aax3100.

DIAS, L. C. P.; PIMENTA, F. M.; SANTOS, A. B.; COSTA, M. H.; LADLE, R. J. Patterns of land use, extensification, and intensification of Brazilian agriculture. *Global Change Biology*, v. 22, n. 8, p. 2887–2903, 2016. DOI: 10.1111/gcb.13314.

DE LIMA, R.A.F.; OLIVEIRA, A.A.; PITTA, G.R. et al. The erosion of biodiversity and biomass in the Atlantic Forest biodiversity hotspot. *Nature Communications*, v. 11, p. 6347, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20217-w>.

DOBROVOLSKI, R. Marx's ecology and the understanding of land cover change. *Monthly Review*, v. 64, n. 1, p. 31-39, 2012

EMBRAPA. *Avaliação da relação entre soja e produção de biodiesel*. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/30053/1/167.pdf>. Acesso em: 19 abr. 2024.

EMBRAPA. *Biocombustíveis*. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/soja/pos-producao/agroenergia/biocombustiveis>. Acesso em: 19 abr. 2024.

EMBRAPA. *Intensificação Ecológica da Agricultura*. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/147388/1/Doc-208.pdf>.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. *The statistic division – FAOSTAT*. Paris: FAO, 2022. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/>. Acesso em: 18 dez. 2023.

FORESTS AND FINANCE. *Banking on Biodiversity Collapse*. 2023. Disponível em: <https://forestsandfinance.org/banking-on-biodiversity-collapse/>. Acesso em: 30 out. 2024.

FUNDAÇÃO JOAQUIM NABUCO (FUNDAJ). Panorama setorial: força do Matopiba. Disponível em: [https://www.gov.br/fundaj/pt-br/destaques/observa-fundaj-itens/observa-fundaj/tecnologias-de-convivencias-com-as-secas/panorama-setorial-forca-do-matopiba#:~:text=Regi%C3%A3o%20considerada%20a%20grande%20fronteira,principalmente%20soja%2C%20milho%20e%20algod%C3%A3o](https://www.gov.br/fundaj/pt-br/destaques/observa-fundaj-itens/observa-fundaj/tecnologias-de-convivencias-com-as-secas/panorama-setorial-forca-do-matopiba#:~:text=Regi%C3%A3o%20considerada%20a%20grande%20fronteira,principalmente%20soja%2C%20milho%20e%20algod%C3%A3o.). Acesso em: 22 out. 2024.

FOLEY, J. A. Global Consequences of Land Use. *Science*, v. 309, n. 5734, p. 570–574, 2005. DOI: 10.1126/science.1111772.

FOLEY, J. et al. Solutions for a cultivated planet. *Nature*, v. 478, p. 337–342, 2011. DOI: 10.1038/nature10452.

FOSTER, John Bellamy. Marx and the Rift in the Universal Metabolism of Nature. *Monthly Review*, v. 65, n. 7, p. 1-19, 2013.

FOSTER, J. B.; CLARK, B.; YORK, R. *The Ecological Rift: Capitalism's War on the Earth*. New York: NYU Press, 2010.

FRIEDMAN, Michael. Metabolic Rift and the Human Microbiome. *Monthly Review*, v. 70, n. 3, p. 70–105, 2018.

GLIESSMAN, S. R. *Agroecology: Ecological Processes in Sustainable Agriculture*. Chelsea, MI: Ann Arbor Press, 1998.

GORDON, A.; BULL, J. W.; WILCOX, C.; MARON, M. Perverse incentives risk

undermining biodiversity offset policies. *Journal of Applied Ecology*, v. 52, n. 2, p. 532-537, 2015

GOVERNO DO BRASIL. Marina reforça compromisso com meta de desmatamento zero até 2030. Disponível em:

<https://www.gov.br/secom/pt-br/assuntos/noticias/2024/09/marina-reforca-compromisso-com-meta-de-desmatamento-zero-ate-2030>. Acesso em: 30 out. 2024.

GRIFFON, M. *Qu'est ce que l'agriculture écologiquement intensive?*- Édition Quae, 2013, Collection: Matière à débattre et décider, 224 p. *Économie rurale*, v. 341, p. 121-124, 2014.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. 2019. Disponível em:

https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/02/SPM_Updated-Jan20.pdf.

IPEA – INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. *Expansão da fronteira agrícola no Brasil: desafios e perspectivas*. Brasília: IPEA, 2016. (Texto para Discussão 2223). Disponível em:

https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/6909/1/td_2223.PDF. Acesso em: 26 out. 2024.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Produção Agropecuária*. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/>. Acesso em: 17 abr. 2024.

IPBES. *Glossary: Transformative change*. Disponível em:
<https://www.ipbes.net/glossary-tag/transformative-change>.

KLEIJN, D.; BOMMARCO, R.; FIJEN, T. P.; GARIBALDI, L. A.; POTTS, S. G.; VAN DER PUTTEN, W. H. Ecological intensification: bridging the gap between science and practice. *Trends in Ecology & Evolution*, v. 34, n. 2, p. 154–166, 2019.

KEHOE, L.; ROMERO-MUÑOZ, A.; POLAINA, E. et al. Biodiversity at risk under future cropland expansion and intensification. *Nature Ecology & Evolution*, v. 1, p. 1129–1135, 2017. DOI: 10.1038/s41559-017-0234-3.

LEWIS, S.; MASLIN, M. Defining the Anthropocene. *Nature*, v. 519, p. 171–180, 2015. DOI: 10.1038/nature14258.

LEWONTIN, R.; LEVINS, R. *The Dialectical Biologist*. Cambridge: Harvard University Press, 1985.

LOPES, Alfredo Scheid; GUILHERME, Luiz Roberto Guimarães. Fertilidade do solo e produtividade agrícola. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. *Fertilidade do solo*. 1a. ed. Viçosa: SBCS, 2007. cap. 1, p. 2-64.

LIU, Y.; XU, Y.; ZHANG, F. et al. The impact of biofuel plantation on biodiversity: a review. *Chinese Science Bulletin*, v. 59, p. 4639–4651, 2014. DOI: 10.1007/s11434-014-0639-1.

HOOPER, D. U.; CHAPIN, F. S.; EWEL, J. J.; HECTOR, A.; INCHAUSTI, P.; LAVOREL, S.; ... WARDLE, D. A. Effects of biodiversity on ecosystem functioning: A consensus of current knowledge. *Ecological Monographs*, v. 75, n. 1, p. 3–35, 2005. DOI: 10.1890/04-0922.

MAEDA, E. E.; ABERA, T. A.; SILJANDER, M.; ARAGÃO, L. E.; MOURA, Y. M. D.; HEISKANEN, J. Large-scale commodity agriculture exacerbates the climatic impacts of Amazonian deforestation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 118, n. 7, p. e2023787118, 2021.

MARIO R. MOURA, GIBRAN A. OLIVEIRA, ADRIANO P. PAGLIA, MATHIAS M. PIRES, BRÁULIO A. SANTOS. Climate change should drive mammal defaunation in tropical dry forests. *Global Change Biology*, v. 29, n. 24, p. 6931–6944, 2023. DOI: 10.1111/gcb.16979.

MACLAREN, C.; MEAD, A.; VAN BALEN, D. et al. Long-term evidence for ecological intensification as a pathway to sustainable agriculture. *Nature Sustainability*, v. 5, p. 770–779, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41893-022-00911-x>.

MARX, Karl. *O capital: crítica da economia política*. v. 3, tomo II. São Paulo: Boitempo, 2014.

MAPBIOMAS. Matopiba passa a Amazônia e assume a liderança do desmatamento no Brasil. Disponível em:

<https://brasil.mapbiomas.org/2024/05/28/matopiba-passa-a-amazonia-e-assume-a-lideranca-do-desmatamento-no-brasil/>. Acesso em: 22 out. 2024.

MERLINO, Tatiana. Os números mostram: agronegócio recebe muitos recursos e contribui pouco para o país. *O Joio e O Trigo*, São Paulo, 7 out. 2021. Disponível em: <https://ojoioetrigo.com.br/2021/10/os-numeros-mostram-agronegocio-recebe-muitos-recursos-e-contribui-pouco-para-o-pais/>. Acesso em: 30 out. 2024.

MITIDIEIRO JUNIOR, Marco Antonio; GOLDFARB, Yamila. O agro não é tech, o agro não é pop e muito menos tudo. Setembro de 2021. Disponível em: <https://www.fundaj.gov.br>. Acesso em: 30 out. 2024.

NEWBOLD, T.; HUDSON, L.; HILL, S. et al. Global effects of land use on local terrestrial biodiversity. *Nature*, v. 520, p. 45–50, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature14324>.

ODUM, E. P. *Fundamentos de ecologia*. 6. ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2001.

SAITO, K. *O ecossocialismo de Karl Marx: capitalismo, natureza e a crítica inacabada à economia política*. São Paulo: Boitempo, 2021.

STEFFEN, W.; ROCKSTRÖM, J.; RICHARDSON, K.; LENTON, T. M.; FOLKE, C.; LIVERMAN, D.; & SCHELLNHUBER, H. J. Trajectories of the Earth System in the

Anthropocene. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 115, n. 33, p. 8252-8259, 2018.

SINGER, Paul. O uso do solo urbano na economia capitalista. In: MARICATO, Ermínia (Org.). *A produção capitalista da casa (e da cidade) no Brasil industrial*. 2. ed. São Paulo: Editora Alfa-Omega, 1982. p. 21-36.

WESTON, D. *The Political Economy of Global Warming: The Terminal Crisis*. 1st ed. Routledge, 2014.

Yu, Y., Zhao, W., Martinez-Murillo, J. F., & Pereira, P. (2020). Loess Plateau: from degradation to restoration. *Science of the Total Environment*, 738, 140206.