INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

AGROTÓXICOS NO CENÁRIO GLOBAL: SIMILARIDADE TOXICOLÓGICA VERSUS DIVERGÊNCIA REGULATÓRIA - UMA ANÁLISE BASEADA NO ENVIRONMENTAL IMPACT QUOTIENT

Pesticides on the global stage: toxicological similarity versus regulatory divergence - an analysis based on the environmental impact quotient

Luis Eduardo Pacifici Rangel, Giovana Maria Tadaieski Arruda, Gisele Pereira Domiciano

Resumo: Este estudo analisa comparativamente a toxicidade e os modelos regulatórios de agrotóxicos no Brasil, Estados Unidos, União Europeia e Japão, utilizando o *Environmental Impact Quotient* (EIQ) como métrica central. A pesquisa revela um paradoxo regulatório: embora a toxicidade média dos ingredientes ativos seja semelhante entre os países (EIQ ≈ 50-55), sem diferenças estatisticamente significativas (ANOVA, p=0,66), os modelos regulatórios apresentam divergências profundas. Identificou-se alta convergência entre Brasil e EUA (97,7% de similaridade), contrastando com a abordagem preventiva da UE e o modelo híbrido japonês. Os inseticidas demonstraram os maiores valores de EIQ em todos os países, destacando-se como classe prioritária para políticas de substituição. A análise evidencia a necessidade de harmonização internacional de critérios e adoção de métricas integradas como o EIQ para fortalecer a governança regulatória brasileira e promover a transição para uma agricultura sustentável baseada em evidências científicas.

Palavras-chave: Agrotóxicos; toxicologia regulatória; *Environmental Impact Quotient* (EIQ) .

Abstract: This study provides a comparative analysis of pesticide toxicity and regulatory models in Brazil, United States, European Union, and Japan using the Environmental Impact Quotient (EIQ) as the central metric. The research reveals a regulatory paradox: while the average toxicity of active ingredients is similar among countries (EIQ ≈ 50-55) with no statistically significant differences (ANOVA, p=0.66), regulatory models show profound divergences. High convergence was identified between Brazil and the US (97.7% similarity), contrasting with the EU's preventive approach and Japan's hybrid model. Insecticides showed the highest EIQ values across all countries, emerging as a priority class for substitution policies. The analysis highlights the need for international criteria harmonization and adoption of integrated metrics like EIQ to strengthen Brazilian regulatory governance, promoting the transition towards evidence-based sustainable agriculture.

Keywords: Pesticides; regulatory toxicology; *Environmental Impact Quotient* (EIQ) .

Sobre os autores

Luis Eduardo Pacifici Rangel

Engenheiro Agrônomo, Especialista e Mestre em Agropecuária Sustentável, ex-Secretário de Defesa Agropecuária e Ex-Diretor de Análise Econômica e Políticas Públicas do MAPA

Gisele Pereira Domiciano

Engenheira Agrônoma, Mestre e Doutora em Fitopatologia pela Universidade de Viçosa. Especialista em Biotecnologia e manejo integrado de doenças em plantas

Giovana Arruda

Engenheira Agrônoma, Mestre em Fitopatologia. Especialista em Geoprocessamento e Paisagismo Ecológico.

1. Introdução

Os agrotóxicos são insumos fundamentais para a agricultura moderna e são destinados ao controle e prevenção de agentes fitopatogênicos, insetos e plantas daninhas atuando na proteção das lavouras. No Brasil, a Lei nº 14.785/2023, conhecida como Lei dos Agrotóxicos, atualizou as regras para o registro, produção, comercialização e uso desses produtos. A nova legislação moderniza as regras para os negócios, ao mesmo tempo em que estabelece aprimoramentos para a proteção da saúde e do meio ambiente, simplificando processos, mas também aumentando o rigor na fiscalização e as penalidades para infrações. Entretanto, mesmo com esforços na fiscalização e com o uso crescente desses insumos, o tema tem despertado preocupações em relação à toxicidade ambiental e os consequentes riscos humanos, bem como à sua persistência no meio ambiente e às diferentes abordagens regulatórias adotadas em outros países (PAN, 2021; OECD, 2023).

Dados da FAO indicam que, entre 1990 e 2020, o volume global de ingredientes ativos aplicados praticamente dobrou, superando 3 milhões de toneladas anuais (Obregon et al., 2025). No Brasil, esse aumento acompanha a expansão da fronteira agrícola e a intensificação produtiva, com destaque para as culturas de soja, milho e algodão. Esse avanço, embora associado ao incremento de rendimentos, expõe a necessidade de avaliar não apenas a produtividade absoluta, mas a sua relação com os impactos ambientais e sociais decorrentes do uso intensivo de insumos químicos (Felema et al., 2022).

Neste estudo, conduzimos uma análise comparativa dos ingredientes ativos utilizados em quatro mercados — Brasil (BR), Estados Unidos (EUA), União Europeia (UE) e Japão (JP) — empregando o EIQ como indicador sintético de toxicidade. O objetivo é avaliar a convergência ou divergência entre os regimes regulatórios e discutir o grau de sobreposição entre os produtos aprovados em cada país.

2. Contexto

A harmonização global do controle de agrotóxicos é limitada, e cada país aplica critérios distintos de avaliação de risco e de registro. As avaliações de impacto ambiental conduzidas pela União Europeia nas últimas décadas consolidaram uma abordagem regulatória fortemente ancorada no princípio da precaução, o que ocasionou à exclusão sistemática de substâncias com evidências potenciais de toxicidade aguda, persistência ambiental ou bioacumulação, mesmo na ausência de consenso científico definitivo.

O processo de reavaliação periódica de ingredientes ativos, conduzido pela European Food Safety Authority (EFSA) e pela European Chemicals Agency (ECHA), prioriza a prevenção de riscos cumulativos e sinérgicos à saúde humana e aos ecossistemas, resultando na proibição ou restrição de diversos pesticidas amplamente utilizados em outros países, como os neonicotinoides e certos fungicidas. Essa política reflete uma tendência de substituição tecnológica, impulsionando o desenvolvimento e a adoção de bioinsumos e defensivos de baixo impacto, mas também gera assimetrias comerciais e desafios de convergência regulatória para países exportadores, como o Brasil e os Estados Unidos, que baseiam suas avaliações em modelos de gestão de risco e não na exclusão preventiva de substâncias (FAO & WHO, 2022).

O *Environmental Impact Quotient* (EIQ) foi desenvolvido inicialmente por Kovach et al. (1992) como uma ferramenta voltada para a estimativa do risco ambiental em sistemas agrícolas. Desde então, o EIQ tem sido amplamente utilizado para a avaliação comparativa de programas de manejo de pragas, consolidando-se como um dos indicadores mais empregados na literatura internacional. O EIQ constitui um indicador sintético elaborado para avaliar os impactos ambientais e à saúde decorrentes do uso de pesticidas. Sua estrutura combina métricas relacionadas ao risco para três dimensões principais: trabalhadores rurais (exposição dérmica e toxicidade crônica), consumidores (resíduos em alimentos e água, persistência no solo e nas plantas, além do potencial de lixiviação) e ecossistemas (toxicidade para aves, peixes, abelhas e artrópodes benéficos).

Sua versão mais atualizada, o *Field Use* EIQ, passou por aprimoramento e hoje combina informações de toxicidade a trabalhadores, consumidores e organismos não alvo com parâmetros de dose e frequência de aplicação, permitindo comparações entre programas de manejo (Obregon et al., 2025). Embora o EIQ seja reconhecido internacionalmente e adotado pela FAO, sua aplicação em países como o Brasil ainda é incipiente, em parte devido à predominância de classificações regulatórias próprias, como o Potencial de Periculosidade Ambiental (PPA) do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA, que não necessariamente dialogam com a melhor ciência disponível (Spadotto, 2006; Brasil, 1996).

3. Metodologia

O conjunto de dados analisado neste estudo é composto por 87 ingredientes ativos de agrotóxicos, selecionados a partir de um critério de relevância econômica segundo a relação de Pareto, de modo a representar mais de 80% do volume total de vendas no Brasil. Esses compostos foram caracterizados por 30 variáveis quantitativas e qualitativas, abrangendo indicadores de toxicidade ocupacional, risco ao consumidor e impacto ecológico, além de informações sobre volume comercializado (ano-base 2023), *status* regulatório e presença nos quatro principais mercados regulatórios: Brasil, Estados Unidos, União Europeia e Japão. A seleção priorizou os ingredientes de maior participação comercial, conforme registros do IBAMA, o que garante a representatividade das substâncias de maior relevância econômica e ambiental no contexto nacional.

As informações sobre o registro e o *status* regulatório de cada ingrediente ativo em cada jurisdição foram obtidas diretamente das bases oficiais das respectivas autoridades regulatórias, como forma de assegurar a comparabilidade dos critérios de aprovação, reavaliação e restrição de uso entre os países analisados.

Como métrica central de impacto ambiental e humano, empregou-se o EIQ (Kovach et al., 1992), índice composto que integra parâmetros de toxicidade relacionados à exposição ocupacional, resíduos no alimento e efeitos ambientais indiretos, permitindo a quantificação do risco relativo associado a cada ingrediente ativo sob uma perspectiva multidimensional.

A análise estatística foi conduzida em cinco etapas sequenciais:

1. análise descritiva dos valores de EIQ por país, incluindo medidas de tendência central (média, mediana) e dispersão (quartis, desvio padrão);
2. testes de significância estatística (ANOVA e Kruskal–Wallis) para verificar diferenças entre médias e distribuições de EIQ entre países;
3. análise de similaridade regulatória, com a utilização do índice de Jaccard para estimar o grau de convergência entre pares de países quanto à aprovação ou restrição de ingredientes ativos;
4. classificação funcional dos ingredientes por classe toxicológica (herbicidas, inseticidas e fungicidas) e identificação dos compostos de maior risco (EIQ > 70);
5. análise de correlação entre regimes regulatórios, com base em matrizes binárias de presença/ausência de substâncias nos diferentes mercados.

A execução das análises foi realizada em ambiente Python, com o suporte das bibliotecas Pandas, NumPy, SciPy Stats. As etapas de organização, limpeza e estruturação dos dados foram conduzidas com o Pandas, enquanto os testes inferenciais foram realizados por meio do SciPy Stats, com aplicação do teste de Shapiro–Wilk para verificação da normalidade e do teste U de Mann–Whitney para comparação das distribuições não paramétricas de EIQ entre os grupos.

A visualização dos resultados foi implementada com Matplotlib e Seaborn, o que permitiu a geração de boxplots, histogramas comparativos, matrizes de correlação e curvas de distribuição cumulativa, que favoreceram a interpretação dos padrões estatísticos e regulatórios observados. Todas as análises seguiram rigor metodológico, adotando-se um nível de significância de $\alpha = 0{,}05$.

O delineamento proposto permite a comparação de padrões de risco e de convergência regulatória entre países, que forneceu subsídios empíricos à discussão sobre a harmonização internacional de critérios técnicos, a gestão diferenciada de substâncias ativas e o aperfeiçoamento das políticas públicas de manejo sustentável de agrotóxicos.

4. Resultados e Discussão

4.1. Toxicidade média (EIQ) e convergência regulatória entre países: Brasil, EUA, UE e Japão

Os valores médios de EIQ dos ingredientes ativos foram semelhantes entre os países, com destaque para Japão (53,44), Brasil (53,17) e Estados Unidos (53,07), enquanto a União Europeia apresentou valor ligeiramente menor (49,34), conforme a tabela 1. Não houve diferença significativa pela ANOVA, teste F (F=0,5273; p=0,6639), entre os países em relação à toxicidade média dos ingredientes ativos, medida pelo EIQ.

Tabela 1. Comparação internacional da toxicidade média dos ingredientes ativos agrícolas

País	**Ingredientes**	**EIQ médio**	**EIQ mediana**	**EIQ > 70 (%)**	**Faixa (mín–máx)**
BR	87	53.17	50.00	14.9	21.5–115.3
UE	40	49.34	46.66	7.5	26.0–108.2
EUA	85	53.07	50.00	14.1	21.5–115.3
JP	62	53.44	50.00	11.3	21.5–115.3

BR= Brasil; EUA= Estados Unidos da América; JP=Japão; EU= Uniao Europeia

Resultados consistentes foram obtidos pelo teste não paramétrico de Kruskal–Wallis (H = 1,92; p = 0,59), tendo-se confirmado a ausência de variação significativa entre grupos. Esses achados indicam convergência nos padrões médios de toxicidade dos ingredientes aprovados, independentemente das diferenças nos regimes regulatórios.

4.4. Sobreposição e correlação entre países

A análise de similaridade, baseada no índice de Jaccard, evidenciou distintos graus de convergência regulatória entre os países avaliados. Observou-se elevada similaridade entre Brasil e Estados Unidos (J = 0,977), indicando que ambos compartilham praticamente o mesmo conjunto de ingredientes ativos registrados. A relação entre Brasil e Japão apresentou similaridade intermediária (J = 0,713), enquanto a comparação entre Brasil e União Europeia revelou apenas 46% de sobreposição, refletindo a política regulatória mais restritiva adotada pelo bloco europeu. Por sua vez, a similaridade entre Estados Unidos e Japão foi de 70,9%, sugerindo alinhamento moderado nos registros de agrotóxicos.

Diante dos resultados apresentados observa-se um paradoxo regulatório: a toxicidade média dos agrotóxicos é semelhante entre países analisados, mas a convergência normativa é limitada. Isso indica que, embora as abordagens de avaliação de risco variem, o resultado prático — substâncias de alta toxicidade em uso — é globalmente compartilhado.

A União Europeia destaca-se pela exclusão de diversos ingredientes (EIQ acima de 70), o que explica seu menor valor médio. Ainda assim, compostos como abamectina e famoxadona continuam aprovados, o que evidencia limites práticos do princípio da precaução diante de pressões produtivas e comerciais.

O Brasil e os Estados Unidos, por outro lado, apresentam altíssima sobreposição (97,7%), o que sugere alinhamento técnico e regulatório. Ambos adotam sistemas de registro baseados em risco e avaliações periódicas de revalidação (*risk management*), priorizando mitigação de exposição em vez de proibição. O Japão ocupa posição intermediária, refletindo uma política de segurança alimentar mais orientada ao consumidor do que ao ecossistema. Sua composição de ingredientes combina restrições seletivas e uso racional de moléculas de alto desempenho.

A presença comum de compostos como neonicotinoides e alguns fungicidas, como do grupo dos triazóis, amplamente associados à mortalidade de polinizadores e resistência fúngica (Goulson, 2013; FAO, 2021), demonstra a dependência global de moléculas de alto impacto, mesmo em países com sistemas rigorosos de regulação. Esses resultados corroboram a literatura sobre a inércia tecnológica e o *lock-in* regulatório do setor de agrotóxicos (Pavitt, 1984; Jørgensen & Andersen, 2020), em que a substituição de moléculas tóxicas é limitada por barreiras econômicas, tempo de registro e falta de alternativas comerciais.

A matriz de correlação apresentada na figura 1 demonstra a relação entre a presença de ingredientes ativos registrados em três mercados regulatórios — União Europeia, Estados Unidos e Japão —, excluindo-se o Brasil. Observa-se que os coeficientes de correlação de Pearson são baixos em todas as combinações de pares ($r = 0,14$ entre UE e EUA; $r = 0,07$ entre EUA e Japão; $r = –0,13$ entre UE e Japão), o que indica baixa convergência regulatória entre esses países.

Em termos científicos, os resultados indicam que as listas de ingredientes aprovados e banidos diferem substancialmente entre os países, refletindo políticas de avaliação de risco, padrões toxicológicos e critérios de precaução distintos. As correlações observadas entre os países da OCDE — positivas entre UE e EUA ($r = 0,14$) e negativas entre UE e Japão ($r = –0,13$) — são fracas e estatisticamente pouco expressivas, sugerindo ausência de convergência efetiva nos padrões regulatórios. Embora exista intercâmbio técnico no âmbito da OCDE, as decisões nacionais continuam a refletir abordagens regulatórias próprias: a União Europeia tende à exclusão preventiva de substâncias, enquanto Estados Unidos e Japão privilegiam estratégias de mitigação e gerenciamento do risco.

De forma geral, a matriz evidencia que não existe um padrão internacional consolidado de convergência regulatória para agrotóxicos, o que implica desafios para a formulação de taxonomias sustentáveis e para a harmonização de métricas de sustentabilidade agrícola, especialmente em países exportadores que precisam atender simultaneamente a múltiplas legislações.

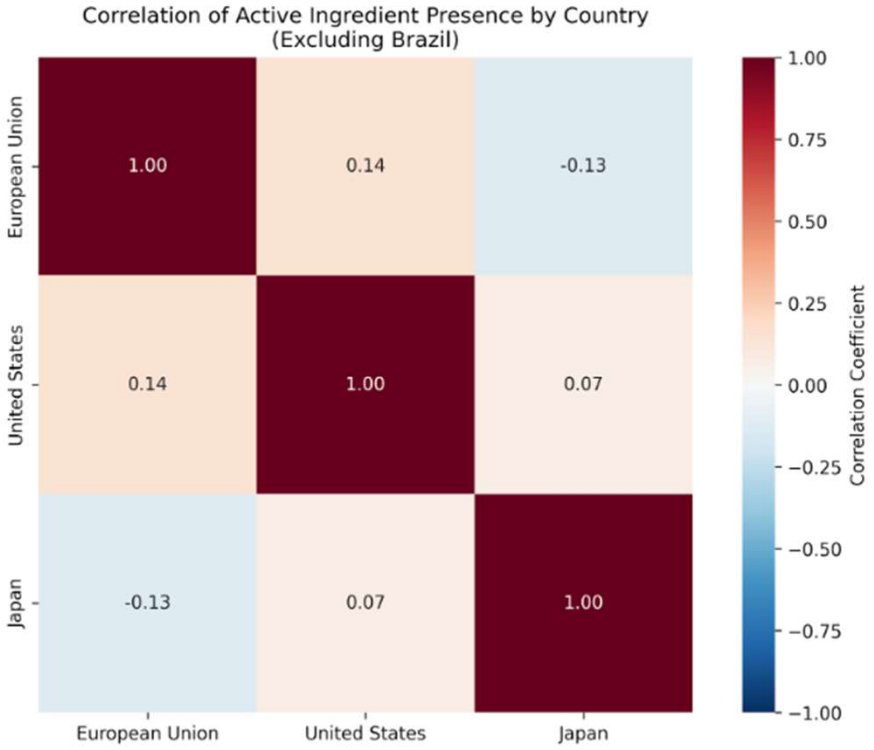

Figura 1. Matriz de correlação de Pearson entre listas de ingredientes ativos registrados em diferentes mercados regulatórios (União Europeia, Estados Unidos e Japão)

A matriz de número de ingredientes mostra, no entanto, uma forte sobreposição entre Brasil e Estados Unidos, com 85 ingredientes em comum (97,7% de similaridade). Isso reflete não apenas a dependência tecnológica compartilhada, mas também a semelhança dos critérios de avaliação de risco, centrados na exposição controlada e não na proibição preventiva (figura 2).

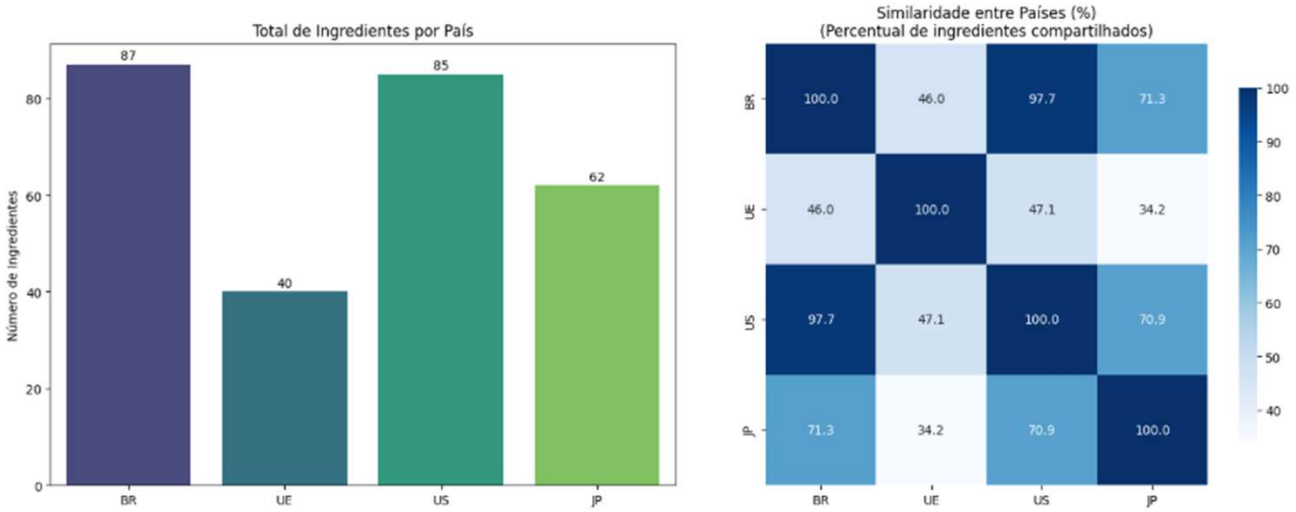

Figura 2. Matriz de similaridade (Jaccard) entre os países analisados e os registros de ingredientes ativos de agrotóxicos.

Por outro lado, a União Europeia, com apenas 40 ingredientes ativos, demonstra seletividade superior, alinhada ao princípio da precaução. O Japão aparece em posição intermediária, com 62 ingredientes e perfil de similaridade de 71,3% com o Brasil, que sugere convergência parcial, especialmente em inseticidas modernos e fungicidas de nova geração.

A figura 3 aprofunda a comparação sob a ótica do impacto ambiental, expressa pelo EIQ. A função de distribuição acumulada (CDF) mostra sobreposição quase total entre BR, US e JP, enquanto a curva da UE se desloca para a esquerda, indicando valores mais baixos de EIQ e, portanto, ingredientes de menor toxicidade média. Os *boxplots* reforçam essa constatação ao exibir medianas próximas de 50 para todos os países e dispersões semelhantes, o que explica a ausência de diferenças estatisticamente significativas (ANOVA, p=0,66).

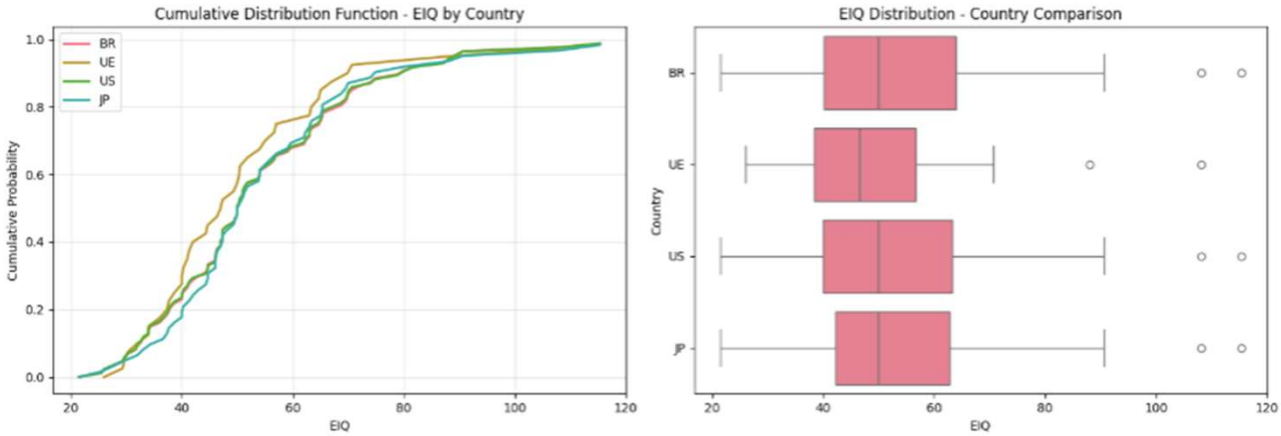

Figura 3. Distribuição e estrutura do EIQ por país

Existem, entretanto, diferenças estruturais por classe de produto: Brasil e Estados Unidos mantêm equilíbrio entre herbicidas, inseticidas e fungicidas, enquanto a União Europeia restringe fortemente o número de inseticidas, coerente com a proibição de neonicotinoides e de outras moléculas associadas à mortalidade de polinizadores. Essa limitação regulatória explica, em parte, o EIQ médio inferior do bloco europeu.

A Figura 4 sintetiza a análise comparativa de risco. Os *boxplots* e os gráficos de violino demonstram que a distribuição do EIQ é homogênea entre países, com valores concentrados entre 40 e 70 e *outliers* superiores a 100 correspondentes a compostos como clotianidina e abamectina. As barras verticais de EIQ médio reforçam a uniformidade toxicológica: JP (53,4), BR (53,2), US (53,1) e UE (49,3).

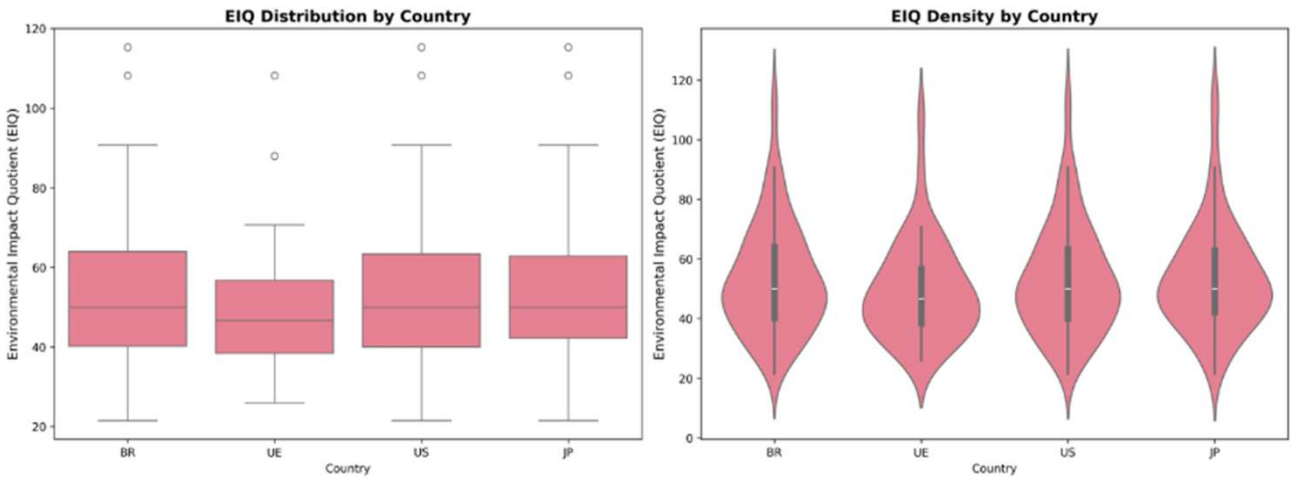

Figura 4. Distribuição e densidade dos valores de EIQ para ingredientes ativos registrados no Brasil, União Europeia, Estados Unidos e Japão

A comparação entre classes de produtos mostra que os inseticidas possuem os maiores valores médios de EIQ (61–63), seguidos por fungicidas (≈55) e herbicidas (≈42), confirmando que os produtos destinados ao controle de insetos representam o maior risco potencial ao ambiente e à saúde humana.

A relação entre EIQ e volume comercializado (Brasil, 2023) apresenta correlação negativa fraca (–0,135), o que indica que o mercado não privilegia produtos mais tóxicos, mas também não os evita (figura 5). O uso parece guiado por fatores de custo, eficácia e disponibilidade, e não por critérios de impacto ambiental

Figura 5. Análise comparativa de risco (EIQ) e volume comercializado.

Em síntese, os resultados revelam um paradoxo regulatório: a toxicidade média dos agrotóxicos é semelhante entre países, mas a divergência normativa é elevada. Enquanto a União Europeia adota postura restritiva e preventiva, Brasil e Estados Unidos mantêm modelo de gestão de risco, permitindo a continuidade de substâncias de alto EIQ mediante medidas de mitigação. Essa convergência entre BR e EUA (97,7%) evidencia o alinhamento de modelos de produção baseado em intensificação produtiva, que contrasta com o modelo europeu.

As evidências gráficas e estatísticas indicam, portanto, que a harmonização internacional dos critérios de toxicidade existe, mas que a redução efetiva do risco ambiental deverá exigir políticas coordenadas de substituição de ingredientes, incentivo à inovação em bioinsumos e fortalecimento das avaliações independentes de risco ecológico.

5. Implicações políticas e regulatórias

Os resultados apresentados evidenciam um cenário de divergência estrutural entre regimes de regulação de agrotóxicos. Embora a toxicidade média (EIQ) não varie significativamente entre os países, as estratégias regulatórias e institucionais diferem substancialmente em seus fundamentos e objetivos. Essas diferenças revelam três modelos paradigmáticos de governança: a precaução (União Europeia), gestão do risco (Brasil e Estados Unidos) e o híbrido adaptativo (Japão).

5.1. O modelo de precaução europeu

A União Europeia destaca-se por adotar o princípio da precaução como eixo central de sua política fitossanitária (Regulamento CE nº 1.107/2009). Nesse modelo, a ausência de certeza científica quanto à inocuidade de uma substância é motivo suficiente para negar ou revogar seu registro. Os dados confirmam esse padrão: com apenas 40 ingredientes ativos e EIQ médio de 49,3, a UE exibe o menor portfólio e a menor toxicidade média. Além disso, as proibições de grupos químicos inteiros, como os neonicotinoides, reduzem a exposição de polinizadores e melhoram a percepção pública sobre segurança alimentar (European Commission, 2023).

O modelo europeu tenta integrar uma avaliação de risco (*human health + ecotoxicology*) com gestão regulatória preventiva, resultando em um portfólio mais previsível, ainda que menos competitivo. Essa estrutura, porém, é frequentemente criticada por criar barreiras técnicas ao comércio internacional, afetando países mais competitivos em termos de agropecuária, como o Brasil. Além disso, não há diferenças significativas entre o perfil toxicológico integrado do portfólio europeu quando comparado aos demais países analisados, o que demonstra que a política é tendenciosa, voltada a aspectos comerciais travestidos de narrativas de segurança.

Na Europa, a reavaliação de substâncias ativas em agrotóxicos é estabelecida por norma. A revisão obrigatória a cada 15 anos e impõe a reapresentação de dossiês completos, com novas evidências toxicológicas, ambientais e de eficácia, o que implica altos custos regulatórios para a manutenção das autorizações. Na prática, muitas empresas optam por não renovar o registro de moléculas mais antigas, sobretudo quando há alternativas tecnológicas mais recentes e protegidas por patente, com perfil ecotoxicológico mais favorável e maior retorno econômico. Essa dinâmica, embora movida por razões de custo-oportunidade, acaba por reduzir o risco médio agregado, refletido em índices menores de impacto ambiental (EIQ) na União Europeia, já que o portfólio de produtos tende a concentrar-se em substâncias de menor periculosidade, mesmo sem diferenças significativas.

5.2. O modelo de gestão de risco (Brasil e Estados Unidos)

Em contraste com o modelo europeu, Brasil e Estados Unidos apresentam uma convergência quase total (97,7%) na lista de ingredientes ativos, o que reflete a adoção do modelo de gestão de risco, em que o foco recai sobre o controle da exposição e não sobre o perigo intrínseco da substância. Ambos os países avaliam o risco com base em níveis aceitáveis de exposição (NOAEL, ADI, LD50) e aplicam medidas mitigadoras (intervalo de segurança, EPI, tecnologia de aplicação) em vez de proibir substâncias de alta toxicidade.

No Brasil, a legislação — ancorada na Lei nº 14.785/2023 — estabelece um processo que tende a privilegiar a continuidade do registro, ainda que condicionada a reanálises periódicas. Essa abordagem tem permitido a manutenção de moléculas de EIQ elevado (>70), apresentada em compostos como clotianidina e abamectina, amplamente usadas no controle de pragas da soja e do algodão. A consequência é um portfólio amplo, com EIQ médio de 53,2, próximo ao dos EUA (53,1).

Contudo, essa similaridade quantitativa esconde fragilidades qualitativas. O sistema brasileiro carece de ferramentas de mensuração integrada de risco, como índices de impacto ambiental nacionais, e de mecanismos de retirada progressiva (*phase-out*) de substâncias comprovadamente perigosas, mas com efetiva implementação de *phase-in* para substitutos com eficiência equivalente. Novos mandatos legais para as priorizações de registro de substâncias frente a nova lei de agrotóxicos podem suprir essa necessidade.

A não adoção de modelos como o EIQ de maneira oficial, ou com equivalente nacional, impede comparações consistentes entre registros e fragiliza a transparência das decisões regulatórias. Entretanto, sob o ponto de vista científico, estudos como este podem esclarecer a real dimensão do compromisso das políticas públicas de agropecuária com a sustentabilidade.

5.3. O modelo híbrido adaptativo japonês

O Japão adota um modelo intermediário, combinando o controle rigoroso de resíduos alimentares com uma regulação mais flexível de ingredientes técnicos. A política japonesa enfatiza a proteção do consumidor, refletida em EIQ médio de 53,4 e na exclusão gradual de moléculas com alto risco de bioacumulação.

Esse modelo busca compatibilizar inovação tecnológica e segurança alimentar, adotando critérios dinâmicos de revisão periódica e sistemas de rastreabilidade robustos, que poderiam inspirar reformas regulatórias em países emergentes. A escolha japonesa foi focada em um dos componentes do índice do EIQ, voltado ao consumidor.

5.4. Desafios e oportunidades para o Brasil

A posição brasileira, embora próxima à norte-americana em termos de composição e toxicidade, enfrenta desafios estruturais. A convergência quase total entre BR e EUA sugere dependência tecnológica e baixa autonomia regulatória, pois grande parte dos ingredientes ativos é desenvolvida e homologada primeiramente nos EUA. Essa percepção se materializa com a implementação pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária - Anvisa do registro por analogia, um modelo de reconhecimento de relatórios internacionais feitos por autoridades de outros países, que reduz a necessidade de uma avaliação completa e minuciosa de todo o dossiê toxicológico de novos produtos.

Além disso, o Brasil carece de instrumentos analíticos integrados de mensuração de risco ecológico. O uso do EIQ neste estudo demonstra a utilidade de métricas compostas para subsidiar políticas públicas, permitindo identificar prioridades de substituição e definir limites diferenciados de risco por classe química. A classificação ambiental de agrotóxicos, criada pela Portaria nº 84/1996 do IBAMA, não possui coerência com as métricas quantitativas do EIQ (Brasil, 1996).

Recentemente, a utilização da classificação ambiental da rotulagem de agrotóxicos foi utilizada para orientar projetos sustentáveis dentro da Taxonomia Sustentável Brasileira. A escolha da restrição do uso de produtos classificados como Altamente Perigoso (classe I) e Muito Perigoso (classe II) em modelos de produção agropecuária sustentável não tem coerência técnica nem efetividade prática (Brasil, 2025).

A partir da análise dos registros de produtos no Brasil com as classificações ambientais 1, 2 e 3, Anvisa e I e II, IBAMA e seus respectivos EIQs, identificou-se que mesmo aqueles com valores mais altos poderão ser utilizados sem restrição em modelos sustentáveis, o que gera um paradoxo regulatório. Isso se deve à vinculação da classificação da Anvisa e do IBAMA às formulações dos produtos e não estritamente aos ingredientes ativos. Portanto, o "escape regulatório" da restrição é de 60,76%, ou seja, a medida não se presta a restringir o uso de substâncias realmente com maior impacto para os fatores ambientais, laborais ou dietéticos (figura 6).

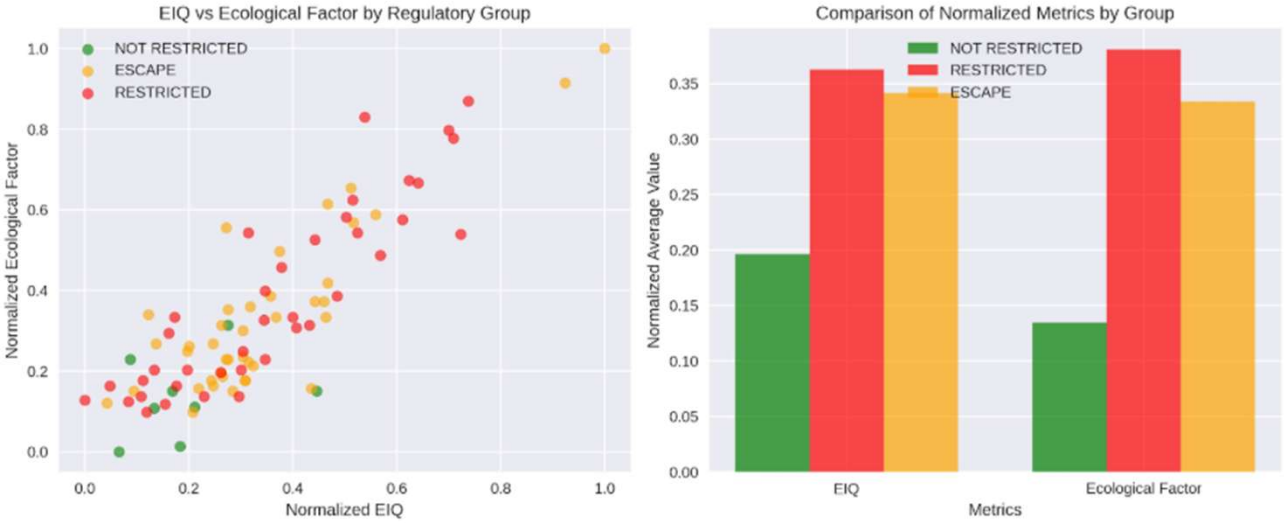

Figura 6. Análise comparativa de risco (EIQ) de produtos com restrição de uso pela classificação ambiental e os escapes regulatórios com formulações registradas no Brasil.

Isso se deve a falsa percepção de que a classificação de perigo, estampada na rotulagem dos produtos possa ser usada para com efeito de orientação de política pública, seja para uma tributação seletiva, seja para a definição de um modelo sustentável de manejo fitossanitário. A heterogeneidade das classificações para produtos similares denota que esse instrumento é ineficiente, apesar dos avanços recentes por parte da Anvisa de incorporação do Global Harmonization System – GHS para a rotulagem.

A incorporação do EIQ por ingrediente ativo e seus volumes de uso como indicadores na gestão nacional permitiria evoluir de um sistema baseado em risco individual para um modelo de impacto ambiental acumulado, mais alinhado aos princípios da saúde única (O*ne Health*) e da agricultura sustentável.

Essa estratégia poderia conectar as diferentes políticas públicas, seja de estímulo à agropecuária sustentável seja de redução do risco do portfólio nacional, sobre métricas coerentes e cientificamente comprovadas.

O fortalecimento da reanálise periódica obrigatória, a criação de um índice nacional de impacto fitossanitário e a integração de dados de volume de uso e toxicidade em um banco público de monitoramento são medidas fundamentais para aumentar a eficiência regulatória e a confiança internacional no sistema brasileiro. Relacionar a classificação de alto impacto do EIQ e volume de uso, poderia ensejar uma agenda de reavaliações com verdadeira base científica.

5.5. Convergência internacional e governança global

A alta correlação entre países indica uma tendência regulatória global, apenas afastando a União Europeia, o que enseja rastreabilidade e custos ao comércio entre blocos econômicos.

Para enfrentar esse desafio, organismos multilaterais como a FAO, a OCDE e o Codex Alimentarius vêm promovendo a harmonização de critérios toxicológicos e ambientais. O uso de métricas integradas, como o EIQ e outros modelos de índices de pegada ambiental, oferece caminho promissor para alinhar os sistemas nacionais, incorporando variáveis ecológicas, socioeconômicas e climáticas.

No caso brasileiro, o fortalecimento da diplomacia fitossanitária e a adoção de mecanismos de equivalência técnica com a UE e o Japão poderiam reduzir barreiras não tarifárias, ao mesmo tempo em que incentiva a transição para moléculas de menor impacto e maior seletividade biológica. Essas medidas são essenciais para compatibilizar competitividade comercial e responsabilidade ambiental, assegurando a inserção estratégica do país nos mercados sustentáveis emergentes.

Tabela 4. Síntese da análise de modelos regulatórios internacionais para agrotóxicos

Modelo regulatório	País(es)	Estratégia central	Indicadores observados	Implicações
Precaução	União Europeia	Proibição preventiva com base em perigo intrínseco	40 ingredientes; EIQ médio 49,3	Menor toxicidade média; risco reduzido de externalidades
Gestão de risco	Brasil, EUA	Permissão condicionada à mitigação da exposição	87 (BR), 85 (US); EIQ médio 53	Manutenção de moléculas perigosas; alta convergência técnica
Híbrido adaptativo	Japão	Revisões periódicas e ênfase no consumidor	62 ingredientes; EIQ médio 53,4	Transição gradual para moléculas mais seguras

5.6. Reanálise e reavaliação: evidências empíricas e coerência regulatória

A reavaliação de ingredientes ativos é um instrumento essencial para ajustar o marco regulatório às evidências científicas mais recentes. A análise comparativa entre os grupos de substâncias — proibidas no Brasil sob recomendação de reavaliação pela Pesticide Action Network (PAN) e classificadas como poluente organicos persistentes (POP) pela Convenção de Estocolmo — revela padrões consistentes de risco ambiental medido pelo EIQ e seus componentes ecológicos.

A relação entre o EIQ total e o fator ecológico (impacto sobre organismos não alvo), destacando-se os grupos regulatórios, pode ser observada na figura 7. Produtos registrados no Brasil representam o menor risco médio, concentrando-se na faixa de EIQ entre 30 e 60 (verde); produtos proibidos no Brasil e não POP (laranja) concentram valores intermediários, com EIQ entre 70 e 100; Produtos proibidos no mundo todo (POP) (vermelho) localizam-se no quadrante de maior risco (EIQ > 100; *Ecological Factor* > 120).

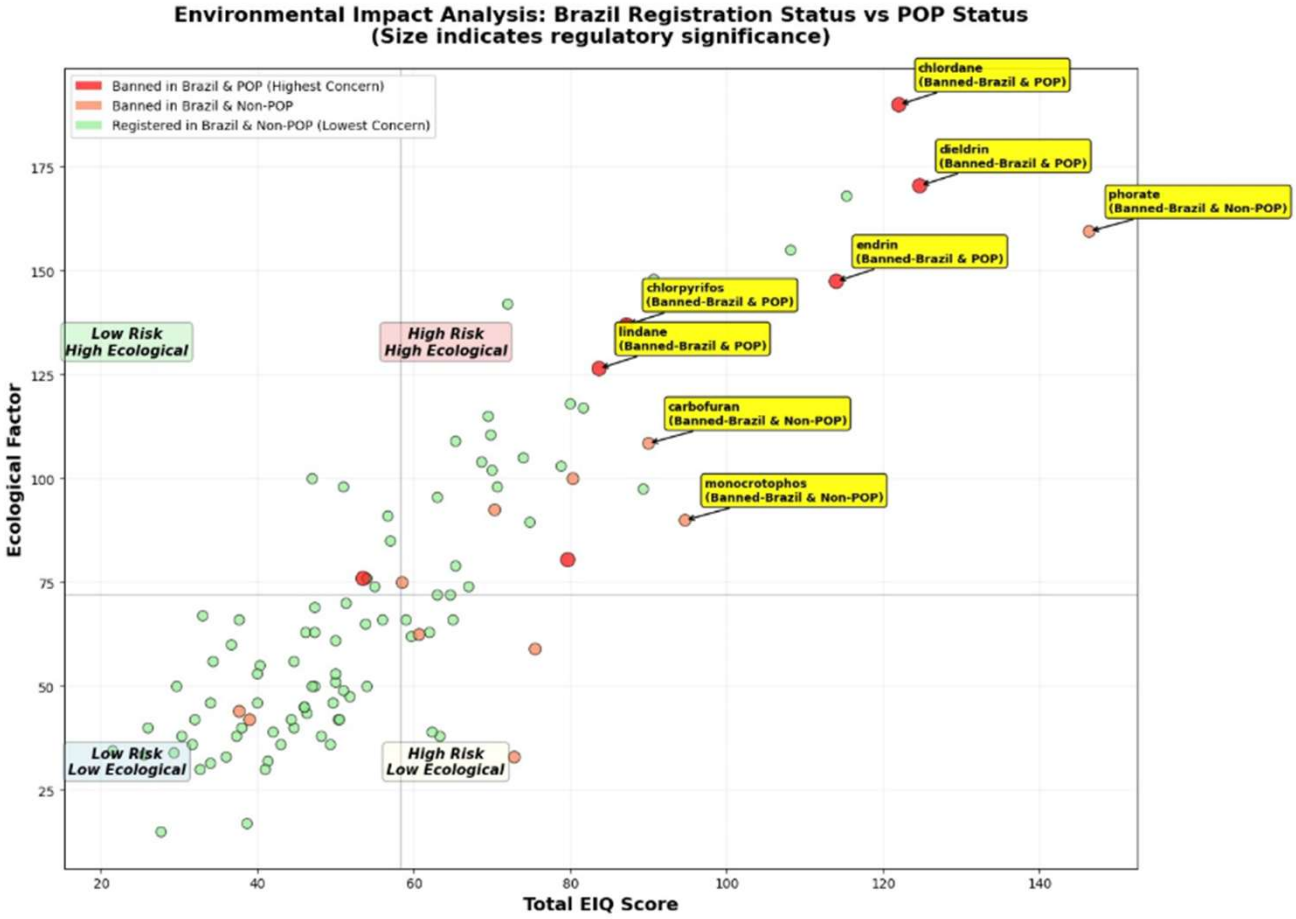

Figura 7. Análise de impacto ambiental dos produtos registrados e proibidos no Brasil com aqueles proibidos na Convenção de Estocolmo (POP).

A dispersão mostra um gradiente de risco crescente das substâncias registradas para as proibidas, com forte correlação entre o EIQ total e o componente ecológico (r ≈ 0,87). Produtos como phorate, dieldrin e chlordane situam-se no extremo superior do eixo, refletindo elevada toxicidade ambiental e coerência com as proibições nacionais.

As distribuições do EIQ para os grupos "registrados x proibidos no Brasil" e "POP *versus* Non-POP" podem ser vistas na Figura 8. Os *boxplots* confirmam que os produtos proibidos apresentam mediana e dispersão mais elevadas, enquanto os POPs concentram valores acima de 90. A sobreposição parcial entre proibições nacionais e POPs indica alinhamento parcial com tratados internacionais, mas também lacunas de convergência, visto que nem todos os compostos de alto EIQ foram ainda reavaliados no país.

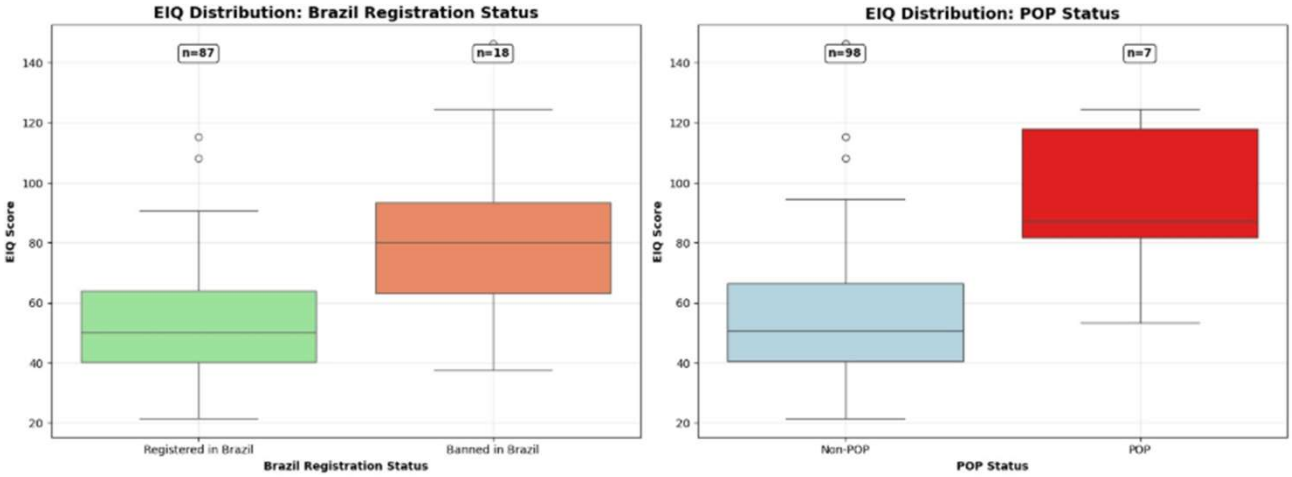

Figura 8. Distribuição dos valores de EIQ entre produtos registrados e proibidos no Brasil os POPs e os demais produtos.

As análises confirmam que o Brasil tem estado alinhado, em geral, à tendência de proibições de substâncias com EIQ elevado e impacto ecológico relevante. As exceções à regra estão nos casos de conclusão pela proibição dos ingredientes ativos procloraz (58,5) e thiram (39) pelo Brasil, com EIQ bem menor que a média de produtos ainda sem nenhuma restrição no país. Isso pode ser explicado pela liderança da Anvisa no processo de reavaliação de agrotóxicos no Brasil e que aspectos de risco diferentes daqueles mapeados pelo EIQ motivaram a proibição desses produtos (Anvisa, 2020).

A ausência de diferença estatística entre produtos com sugestões de entrada em reanálise por organizações internacionais como a PAN reforça que o processo de priorização ainda não reflete a magnitude do risco, sugerindo a integração do EIQ às reavaliações oficiais (PAN, 2025).

A incorporação de métricas compostas como o EIQ ao processo regulatório nacional pode aprimorar a consistência técnica das reavaliações, reduzir assimetrias entre proibições nacionais e internacionais e fortalecer a credibilidade científica da política de agrotóxicos no Brasil.

6. Recomendações de política pública

A presente análise comparativa conduzida entre Brasil, União Europeia, Estados Unidos e Japão, com base em um conjunto de 87 ingredientes ativos e no indicador composto EIQ, evidencia um cenário de alta convergência tecnológica entre os países e baixa harmonização regulatória.

Os resultados e implicações regulatórias aqui discutidos revelam que a convergência tecnológica não implica harmonização normativa. A adoção de indicadores compostos como o EIQ e a incorporação de métricas ambientais nacionais são passos essenciais para alinhar o sistema regulatório brasileiro aos padrões internacionais, reduzindo riscos, fortalecendo a credibilidade científica das decisões e criando condições para uma agricultura sustentável baseada em evidências.

Apesar de diferenças institucionais e políticas marcantes, os quatro países apresentam níveis médios de toxicidade semelhantes (EIQ ≈ 50–55) e distribuições estatisticamente indistinguíveis. Isso indica que, na prática, o mercado global de agrotóxicos permanece sustentado por moléculas de risco comparável, ainda que sujeitas a distintas interpretações jurídicas e ambientais.

6.1. Síntese dos achados

- **Homogeneidade toxicológica**: a análise de variância (ANOVA) e o teste de Kruskal-Wallis confirmaram a inexistência de diferenças significativas no EIQ entre países ($p>0,6$); as distribuições e densidades do EIQ reforçam esse padrão de convergência, com medianas próximas a 50.
- **Divergência regulatória**: as matrizes de correlação e similaridade revelam baixa correlação entre blocos econômicos, com destaque para a forte sobreposição entre Brasil e Estados Unidos (97,7%), em comparação com a União Europeia (46%) e o Japão (71%).
- **Hierarquia de risco por classe química**: em todos os países, os inseticidas apresentaram os maiores EIQ médios (≈61–63), seguidos por fungicidas (~55) e herbicidas (~42). Essa tendência reforça a necessidade de políticas específicas voltadas à substituição de inseticidas de amplo espectro e à promoção de controle biológico.
- **Ausência de relação entre risco e volume**: a correlação fraca e negativa ($r = –0,135$) entre EIQ e o volume comercializado no Brasil indica que a intensidade de uso não se orienta por critérios de impacto ambiental, mas por fatores de custo, disponibilidade e eficácia agronômica.
- **Assimetria institucional**: enquanto a UE adota o princípio da precaução, privilegiando a prevenção e a exclusão de moléculas de risco elevado, Brasil e EUA seguem o modelo de gestão de risco, baseado na mitigação de exposição; o Japão atua de forma híbrida, com reavaliações periódicas e foco no consumidor.

6.2. Implicações para a governança brasileira

O caso brasileiro demanda uma reforma institucional orientada à transparência, mensuração e "*accountability*" regulatória. A convergência quase total com os EUA e a presença de compostos de alto EIQ evidenciam dependência tecnológica e fragilidade nos mecanismos de reavaliação. É urgente avançar de um sistema baseado na gestão de risco individual para um modelo de impacto acumulado que considere efeitos ecotoxicológicos e sociais integrados.

Entre as medidas prioritárias destacam-se:

- criação de um índice de fitossanidade sustentável (IFS), ou **manejo integrado de pragas regenerativo** (MIP-R), inspirado no **EIQ**, adaptado às condições tropicais e integrando dados de toxicidade, persistência, bioacumulação e volume de uso;
- institucionalização de **reavaliações periódicas** obrigatórias, com prazos definidos por classe química e transparência nos relatórios técnicos;
- integração interinstitucional via **plataforma digital única**, já prevista há mais de 20 anos, mas ainda não executada, com dados abertos sobre registros, volumes e riscos;
- modelos de **incentivos econômicos** (fiscal, creditício e regulatório) para substituição de moléculas críticas, favorecendo bioinsumos e princípios ativos de baixo impacto, em consonância com a Política Nacional de Bioinsumos (Decreto nº 10.375/2020); e
- fortalecimento de modelos de rastreabilidade de uso de agrotóxicos, principalmente com o **receituário agronômico**.

Essas medidas fortaleceriam a credibilidade internacional do sistema regulatório brasileiro, ampliando a aceitação de seus produtos agrícolas em mercados *premium* (como UE e Japão), e reduziriam riscos de barreiras não tarifárias associadas a divergências toxicológicas.

7. Conclusão

Os resultados obtidos conduzem a reflexão de que o principal desafio associado ao uso de agrotóxicos não reside na quantidade de substâncias empregadas, mas na qualidade e na coerência dos mecanismos de governança que regulam sua utilização. Não se observou diferença estatística significativa quanto à toxicidade média (EIQ) dos ingredientes ativos entre os países avaliados, ainda que os marcos regulatórios apresentem graus distintos de rigor e abrangência.

Observou-se elevada similaridade entre Brasil e Estados Unidos (índice de Jaccard = 0,977), o que sugere forte alinhamento técnico e comercial na composição dos registros de agrotóxicos. Em contraste, a União Europeia destacou-se por adotar uma política regulatória mais restritiva, refletida tanto na menor quantidade de ingredientes aprovados quanto em valores médios de EIQ inferiores aos observados nos demais países, fato atribuído às restrições de inseticidas, mas que, mesmo assim, não resultou em diferença significativa entre os EIQs dos demais países avaliados. Esses resultados apontam para uma assimetria entre os padrões normativos e os níveis de risco efetivo, evidenciando a importância de fortalecer a governança regulatória e a harmonização internacional de critérios de avaliação de risco e sustentabilidade.

Quando se observa as classes dos inseticidas vê-se que estes são consistentemente os mais tóxicos, o que exige prioridade em políticas de substituição e manejo integrado de pragas (MIP). A convergência internacional de ingredientes perigosos evidencia a necessidade de um modelo global de avaliação de risco baseado em impacto ambiental e social acumulado, não apenas em toxicidade isolada.

A transição de um modelo quantitativo (centrado no número de registros e no volume de agrotóxicos) para um modelo qualitativo fundamentado no impacto e no desempenho ambiental parece ser a chave para o alinhamento o agronegócio brasileiro às exigências internacionais de sustentabilidade. Esse processo, conduzido de maneira transparente e científica, estimulará a substituição natural de produtos mais tóxicos por aqueles mais modernos e menos tóxicos, conferindo ainda mais credibilidade às agências reguladoras.

A incorporação de métricas científicas como o EIQ, aliada ao fortalecimento da rastreabilidade e a integração da dimensão ecológica às decisões regulatórias, permitirá ao Brasil avançar na conciliação entre a produtividade e proteção ambiental, consolidando-se como referência global em agricultura sustentável comprometida com a redução dos riscos ambientais.

8. Referências

Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). (2020, October 20). ***Reavaliação de agrotóxicos***. Retrieved February 12, 2025, from https://www.gov.br/Anvisa/pt-br/acessoainformacao/perguntasfrequentes/agrotoxicos/reavaliacao-de-agrotoxicos-2/reavaliacao-de-agrotoxicos

BRASIL. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA). **Portaria Normativa nº 84, de 15 de outubro de 1996.** Dispõe sobre o controle e o registro de agrotóxicos e afins no território nacional. *Diário Oficial da União: seção 1*, Brasília, DF, 16 out. 1996.

BRASIL. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA (2022). **Instrução Normativa nº 34, de 9 de dezembro de 2022**: Estabelece os procedimentos para priorização, reavaliação e substituição de ingredientes ativos de agrotóxicos no Brasil. Diário Oficial da União, 13 December. Available at: https://www.ibama.gov.br/component/legislacao/?view=legislacao&legislacao=99498 (Accessed: 19 October 2025).

BRASIL. Ministério da Fazenda. Taxonomia Sustentável Brasileira [online]. Brasília: Ministério da Fazenda; [data de publicação não informada]. Disponível em: https://www.gov.br/fazenda/pt-br/orgaos/spe/taxonomia-sustentavel-brasileira. Acesso em: [24.10.2025].

COMISSÃO EUROPEIA. ***EU Pesticides Database*** – *Active substances* [online]. Bruxelas: Comissão Europeia; [data de publicação não indicada]. Disponível em: https://ec.europa.eu/food/plant/pesticides/eu-pesticides-database/start/screen/active-substances. Acesso em: [24.10.2025].

European Commission. (2023). **Sustainable Use of Pesticides and the Farm to Fork Strategy**. Brussels.

European Commission. 2009. **Regulation (EC) No 1107/2009** of the European parliament and of the council of 21 October 2009 concerning the placing of plant protection products on the market and repealing council directives 79/117/EEC and 91/414/EEC. Official Journal of the European Union L 309, p. 1-50.

FAO. (2021). **Code of Conduct on Pesticide Management**. Rome: FAO & WHO.

FAO & WHO (2022). International Code of Conduct on Pesticide Management. Rome: FAO.

FELEMA, J.; SPOLADOR, H. F. S. Dependência espacial na agropecuária brasileira e seus efeitos sobre a produção ea produtividade da terra e do trabalho. Nova Economia, v. 32, n. 03, p. 743-774, 2022.

FOOD AND AGRICULTURAL MATERIALS INSPECTION CENTER (FAMIC). *List of Active Ingredients of registered agricultural chemicals under the Agricultural Chemical Regulation Act (Act No. 82 of July 1, 1948) (excluding spreader, sticker, adhesive and adjuvant)* [online]. [s.l.]: FAMIC; [data de publicação não indicada]. Disponível em: https://www.acis.famic.go.jp/eng/ailist/. Acesso em: dia mês ano.

GOULSON, D. (2013). An overview of the environmental risks posed by neonicotinoid insecticides. Journal of Applied Ecology, 50(4), 977–987.

JØRGENSEN, M. S., & ANDERSEN, P. D. (2020). Transitions in pesticide governance: From substitution to integrated management. Environmental Science & Policy, 109, 116–124.

KOVACH, J., PETZOLDT, C., DEGNI, J., & TETTE, J. (1992). A method to measure the environmental impact of pesticides. New York State Agricultural Experiment Station.

OBREGON, D.; HERNANDEZ CORREAL, D.; ESHENAUR, B.; CALIXTO, A. A. Global use of the Environmental Impact Quotient. Science of the Total Environment, v. 997, p. 180235, 2025. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2025.180235.

OECD (2023). Cross-Country Analysis: Approaches to Support Alternatives Assessment and Substitution of Chemicals of Concern. 2nd ed. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development. Available at: ttps://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2023/03/cross-country-analysis-approaches-to-support-alternatives-assessment-and-substitution-of-chemicals-of-concern-2nd-edition_615452f3/71bd2f91-en.pdf (Accessed: 19 October 2025).

PAN, Pesticide Action. PAN international list of highly hazardous pesticides (PAN List of HHPs). 2021.International (2021). List of Highly Hazardous Pesticides. Hamburg: PAN.

PAN Europe. *What substances are banned and authorised in the EU market?* [online]. Disponível em: https://www.pan-europe.info/old/Archive/About%20pesticides/Banned%20and%20authorised.htm. Acesso em: [24.10.2025].

PATHAK, V. M., TRIPATHI, B. D., & SINGH, R. S. (2022). "Current Status of Pesticide Effects on Environment, Human Health and Their Eco-friendly Management." Frontiers in Environmental Science, 10, 861420.

PAVITT, K. (1984). Sectoral patterns of technical change: Towards a taxonomy and a theory. Research Policy, 13(6), 343–373.

SPADOTTO, Claudio Aparecido. Avaliação de riscos ambientais de agrotóxicos em condições brasileiras. 2006.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). *Search for Registered Pesticide Products* [online]. Washington, DC: EPA; [data de publicação não informada]. Disponível em: https://www.epa.gov/safepestcontrol/search-registered-pesticide-products. Acesso em: [24.10.2025].