



PBPC
ISSN 2674-9432



Qualis A3
CAPES 2021-2024



DOI - Crossref

Latindex

Indexado no
Google Acadêmico

CONTAMINAÇÃO DE AQUÍFEROS POR AGROTÓXICOS EM POLOS FRUTÍCOLAS IRRIGADOS: DESREGULAÇÃO ENDÓCRINA E RISCO DE NEOPLASIAS NO SEMIÁRIDO

Paulo Roberto Ramos, Maria Miryam da Silva Alves, Arlete Colaço de Azevêdo, Andreza Monteiro Cavalcante, Danielle Cristina da Silva Dias, Herácliton Neves Araújo, Juraeson Leite Santos, Maria Eliete Ribeiro de Araújo, Bruno Nunes Nogueira, Carla Valois Ribeiro, Jeová Rodrigues Silva.



<https://doi.org/10.36557/2674-9432.2026v5n1p1906-1937>

Artigo recebido em 23 de Dezembro e publicado em 23 de Fevereiro de 2026

ARTIGO ORIGINAL

RESUMO

A expansão da fruticultura irrigada em regiões semiáridas, especialmente no Vale do São Francisco, tem sido associada ao aumento do uso de agrotóxicos e à potencial contaminação de aquíferos utilizados por comunidades ribeirinhas e rurais. O problema central deste estudo reside no paradoxo entre o sucesso econômico do agronegócio irrigado e o passivo sanitário invisibilizado decorrente da presença de resíduos químicos na água para consumo humano. O objetivo principal foi revisar criticamente evidências sobre contaminação hídrica por pesticidas e sua associação com desregulação endócrina e neoplasias em populações expostas. Realizou-se uma revisão integrativa da literatura, conduzida entre outubro de 2025 e janeiro de 2026, com corpus fechado de 33 referências de acesso aberto, analisadas conforme protocolos metodológicos clássicos. Os resultados indicaram detecção recorrente de múltiplos pesticidas em águas subterrâneas e sistemas de abastecimento, predominância de compostos com alta mobilidade ambiental e plausibilidade mecanística de carcinogênese mediada por desregulação hormonal, estresse oxidativo e inflamação crônica. Evidências epidemiológicas apontaram associações entre exposição crônica a pesticidas e aumento de risco de neoplasias, enquanto análises regulatórias revelaram limitações de modelos baseados em substâncias isoladas frente à realidade de misturas químicas. Conclui-se que aquíferos contaminados constituem vetor epidemiológico silencioso e expressão de injustiça hídrica em regiões agrícolas intensivas, exigindo monitoramento territorializado, revisão de parâmetros regulatórios e integração entre agroecologia, segurança hídrica e saúde pública.



Palavras-chave: Monitoramento de águas subterrâneas. Misturas químicas. Justiça hídrica. Exposição crônica. Epidemiologia da saúde rural.

PESTICIDE CONTAMINATION OF AQUIFERS IN IRRIGATED FRUIT PRODUCTION HUBS: ENDOCRINE DISRUPTION AND CANCER RISK IN SEMI-ARID REGIONS

ABSTRACT

The expansion of irrigated fruit production in semi-arid regions, particularly in Brazil's São Francisco Valley, has been accompanied by increased pesticide use and potential contamination of aquifers supplying rural and riverside communities. The central problem addressed in this study is the paradox between the economic success of irrigated agribusiness and the hidden public health burden associated with chemical residues in drinking water. The main objective was to critically review evidence on pesticide contamination of groundwater and its links to endocrine disruption and cancer in exposed populations. An integrative literature review was conducted between October 2025 and January 2026, using a closed corpus of 33 open-access references analyzed according to established methodological frameworks. Results showed recurrent detection of multiple pesticides in groundwater and drinking-water systems, predominance of highly mobile compounds, and mechanistic plausibility for carcinogenesis mediated by hormonal disruption, oxidative stress, and chronic inflammation. Epidemiological evidence indicated associations between chronic pesticide exposure and increased cancer risk, while regulatory analyses revealed limitations of substance-by-substance standards in addressing real-world mixture exposures. We conclude that contaminated aquifers represent a silent epidemiological pathway and a manifestation of water injustice in intensive agricultural regions, highlighting the need for territorialized monitoring, revised toxicological standards, and integration of agroecology, water security, and public health policies.

Keywords: Groundwater monitoring. Chemical mixtures. Water justice. Chronic exposure. Rural health epidemiology.

Instituição afiliada – Programa de Pós-Graduação em Dinâmicas de Desenvolvimento do Semiárido. Universidade Federal do Vale do São Francisco

Autor correspondente: Paulo Roberto Ramos - E-mail: paulo.ramos@univasf.edu.br

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).





1. INTRODUÇÃO

A expansão da fruticultura irrigada em regiões semiáridas brasileiras tem sido frequentemente apresentada como paradigma de modernização agrícola e inclusão produtiva em territórios historicamente marcados por limitações hídricas. No Vale do São Francisco, um dos principais polos exportadores de manga e uva da América Latina, o crescimento da produção foi sustentado por sistemas intensivos de irrigação pressurizada, fertilização química e controle fitossanitário baseado em pesticidas de amplo espectro. Estudos de pegada hídrica cinza aplicados à produção de manga na região demonstram que a carga potencial de poluentes associada ao uso de agrotóxicos pode aumentar significativamente a pressão sobre recursos hídricos, evidenciando externalidades ambientais frequentemente invisibilizadas pelas métricas econômicas do agronegócio irrigado (GOMES *et al.*, 2024).

Avaliações técnicas da Embrapa indicam, de modo convergente, que áreas de produção de uva para exportação no Vale do São Francisco apresentam risco potencial de contaminação de águas superficiais e subterrâneas por pesticidas com elevada mobilidade em solos irrigados, especialmente em cenários de aplicação repetida e recarga hídrica artificial contínua (SILVA *et al.*, 2013).

Em escala global, revisões recentes apontam que a intensificação agrícola baseada em pesticidas tem aumentado a ocorrência desses compostos em aquíferos, configurando um padrão recorrente de contaminação difusa associado à agricultura irrigada em diferentes continentes (ACHARYA *et al.*, 2025). Desse modo, o sucesso exportador da fruticultura irrigada convive com um passivo hidroambiental pouco monitorado, deslocando custos sanitários e ecológicos para populações rurais e ribeirinhas que dependem diretamente da água subterrânea.

Esse paradoxo socioambiental torna-se particularmente relevante quando se consideram as características hidrogeológicas do semiárido brasileiro. Os aquíferos sedimentares associados a vales aluviais e os sistemas cristalinos fissurais apresentam dinâmicas de recarga limitadas e heterogêneas, o que pode favorecer a concentração de contaminantes ao longo do tempo. A mobilidade de pesticidas no solo depende de

parâmetros como solubilidade, coeficiente de adsorção ao carbono orgânico (Koc), persistência ambiental e meia-vida.

Compostos com meia-vida superior a 30–60 dias e Koc inferior a 300 mL/g apresentam alto potencial de lixiviação, podendo atingir profundidades superiores a um metro em solos arenosos submetidos à irrigação intensiva (ACHARYA *et al.*, 2025). Estudos clássicos de avaliação de risco de contaminação hídrica no Brasil já demonstravam que pesticidas com elevada solubilidade e baixa adsorção apresentam maior probabilidade de atingir águas subterrâneas, sobretudo em áreas agrícolas com irrigação contínua e precipitação concentrada (CABRERA; COSTA; PRIMEL, 2008).

Revisões recentes sobre contaminação de água potável no Brasil indicam que compostos organofosforados, triazinas e neonicotinóides são frequentemente detectados em sistemas de abastecimento, revelando limitações estruturais de monitoramento e tratamento e sugerindo persistência ambiental maior que a estimada em avaliações toxicológicas convencionais (COSSU *et al.*, 2024). Em regiões semiáridas, onde a dependência de aquíferos rasos e poços comunitários é elevada, essas características hidrogeoquímicas ampliam a vulnerabilidade de populações locais à contaminação difusa.

Nesse contexto, a água potável constitui uma das principais vias de exposição indireta a misturas de agrotóxicos. Estudos epidemiológicos e ambientais no Brasil evidenciam a presença simultânea de múltiplos pesticidas em sistemas de abastecimento de municípios agrícolas, frequentemente em concentrações individuais abaixo dos limites regulatórios, mas potencialmente relevantes quando considerados efeitos cumulativos e sinérgicos. Análises nacionais demonstraram contaminação disseminada de água potável por pesticidas associada ao aumento do risco de câncer em populações expostas, indicando a necessidade de revisão de parâmetros regulatórios baseados em substâncias isoladas (PANIS *et al.*, 2022).

Investigações baseadas em dados do SISAGUA evidenciam detecção recorrente de pesticidas em água para consumo humano em diferentes estados brasileiros, revelando exposições crônicas mesmo em municípios com monitoramento regular (MORAIS *et al.*, 2025). Estudos epidemiológicos adicionais mostram discrepâncias entre limites legais e concentrações detectadas em sistemas de abastecimento, sugerindo subestimação do risco toxicológico quando se considera apenas a presença

de compostos individuais, sem avaliar interações químicas ou exposição cumulativa (MELANDA *et al.*, 2025). Essas evidências são particularmente preocupantes em comunidades ribeirinhas e tradicionais, cuja dependência de poços e sistemas locais de abastecimento amplia a exposição a aquíferos potencialmente contaminados.

Diante desse cenário, este estudo parte da hipótese de que, em polos frutícolas semiáridos, a contaminação de aquíferos por misturas de agrotóxicos constitui vetor subestimado de exposição crônica associado à desregulação endócrina e ao aumento do risco de neoplasias. Ao integrar evidências hidrogeoquímicas, epidemiológicas e regulatórias, busca-se compreender como a contaminação difusa da água subterrânea pode atuar como determinante ambiental silencioso de doenças crônicas em populações rurais.

Assim, o objetivo deste artigo é revisar criticamente a literatura sobre contaminação hídrica por pesticidas em regiões semiáridas, analisar evidências de efeitos endócrinos e carcinogênicos associados à exposição crônica a misturas químicas e discutir implicações para justiça hídrica e saúde pública, especialmente em comunidades ribeirinhas do Vale do São Francisco e de regiões comparáveis. Ao fazê-lo, pretende-se contribuir para uma abordagem integrada do nexo entre agronegócio irrigado, aquíferos e saúde coletiva, evidenciando que o modelo exportador baseado em intensificação química pode produzir ganhos econômicos imediatos ao custo de riscos sanitários difusos e persistentes, frequentemente invisíveis nas narrativas de desenvolvimento regional.

2. METODOLOGIA

2.1 Tipo de estudo

Esta pesquisa foi delineada como revisão integrativa de literatura, escolhida por sua adequação epistemológica para articular evidências heterogêneas (ambientais, epidemiológicas e regulatórias) em torno de um fenômeno complexo e multiescalar: a contaminação de aquíferos por misturas de agrotóxicos e suas implicações para desregulação endócrina e neoplasias. O desenho metodológico seguiu o entendimento de que a revisão integrativa não se limita a descrever achados, mas revisa, critica e sintetiza a literatura de modo a produzir novas interpretações e enquadramentos conceituais para o problema analisado, conforme orientações de Whittemore e Knafli

(2005) e de Torracó (2005).

O protocolo operacional também foi estruturado em fases sucessivas de formulação do problema, busca, seleção, extração, avaliação crítica e síntese, conforme a sistematização proposta para revisão integrativa em saúde por Souza, Silva e Carvalho (2010) e Mendes, Silveira e Galvão (2008).

A revisão foi conduzida no período de outubro de 2025 a janeiro de 2026, com registro interno das decisões metodológicas (critérios, etapas e justificativas) visando reduzir vieses de seleção e aumentar a transparência analítica. A estratégia de revisão foi construída para sustentar uma síntese crítica, assumindo que “A revisão integrativa é um método que proporciona a síntese de conhecimento e a incorporação da aplicabilidade de resultados de estudos significativos na prática” (SOUZA; SILVA; CARVALHO, 2010).

Em convergência, adotou-se a definição operacional de que a revisão integrativa “permite a busca, a avaliação crítica e a síntese das evidências disponíveis do tema investigado” (MENDES; SILVEIRA; GALVÃO, 2008). Essas formulações foram mobilizadas como fundamentos técnicos para justificar a escolha do método frente ao objetivo de integrar evidências com diferentes desenhos e níveis de inferência.

2.2 Pergunta PICO

A pergunta norteadora foi estruturada pelo framework PICO, por sua aderência a revisões integrativas com foco em contextos e exposições complexas. Definiu-se: P (Population): populações rurais e/ou ribeirinhas residentes em polos frutícolas; I (Interest): exposição crônica a pesticidas mediada pela água subterrânea (aquíferos/poços/sistemas locais de abastecimento); Co (Context): regiões semiáridas e territórios de agronegócio irrigado, com desfechos de desregulação endócrina e neoplasias como eixo interpretativo do impacto em saúde.

A problemática final assumiu a seguinte forma: quais evidências a literatura apresenta sobre contaminação de aquíferos por misturas de agrotóxicos em polos frutícolas semiáridos e sua associação, direta ou indireta, com desregulação endócrina e neoplasias em populações expostas?

2.3 Corpus bibliográfico

A etapa de identificação recuperou um universo inicial de 324 registros (artigos, relatórios técnicos e trabalhos acadêmicos) obtidos por busca ampliada e por rastreamento de referências. Em seguida, procedeu-se à remoção de duplicatas e à triagem por títulos e resumos, culminando na leitura de texto completo dos estudos potencialmente elegíveis. Ao final, constituiu-se um corpus fechado de 33 referências, previamente selecionadas por pertinência e acessibilidade integral em formato aberto, que foi adotado como base exclusiva para a síntese do artigo.

Os critérios de inclusão foram: (i) acesso aberto ao texto completo; (ii) aderência direta ao fenômeno (contaminação hídrica por pesticidas/água subterrânea e/ou exposição humana) e/ou aos desfechos (desregulação endócrina e/ou neoplasias em populações expostas); (iii) aplicabilidade a contextos agrícolas intensivos, com ênfase em regiões semiáridas e polos de fruticultura irrigada; (iv) presença de elementos empíricos, analíticos ou normativos passíveis de extração (dados de monitoramento, métricas de risco, delineamentos epidemiológicos, biomarcadores, parâmetros regulatórios). Foram excluídas referências sem acesso aberto, materiais opinativos sem base documental verificável e estudos cujo foco não permitiu conexão inferencial com a pergunta PICO.

A elegibilidade foi conduzida com lógica de “adequação analítica”, isto é, um estudo foi mantido quando contribuía para pelo menos uma dimensão do modelo interpretativo (contaminação hidrogeoquímica → exposição crônica → plausibilidade biológica/endócrina → risco oncológico → implicações regulatórias), coerente com a orientação de que revisões integrativas podem incorporar múltiplas metodologias para capturar contexto e processos (WHITTEMORE; KNAFL, 2005).

2.4 Extração e análise dos dados

A extração foi realizada por instrumento padronizado (planilha-matriz), construído para capturar: identificação do estudo (ano, país/região, desenho), matriz ambiental (água subterrânea/superficial/abastecimento), pesticidas/“misturas” reportadas, parâmetros quantitativos (frequência de detecção, concentração, limites

de referência quando aplicáveis), população e/ou território exposto, biomarcadores endócrinos quando presentes, desfechos oncológicos (incidência, risco relativo/odds ratio quando reportados), e recomendações regulatórias/metodológicas.

Para reduzir fragilidades interpretativas, a síntese foi orientada por crítica interna (coerência desenho–inferência) e crítica externa (transferibilidade para o semiárido e polos irrigados), em consonância com a ênfase de Torracco (2005) na necessidade de organização conceitual coerente e de relato claro de como a literatura foi identificada, analisada e sintetizada.

A análise foi conduzida por síntese temática com categorias analíticas previamente definidas e refinadas durante a leitura, mantendo rastreabilidade entre achados e interpretação. As categorias finais foram: (1) contaminação hidrogeoquímica (mecanismos de lixiviação, persistência e padrões de detecção); (2) biomarcadores endócrinos (marcadores sistêmicos e plausibilidade mecanística, quando aplicável); (3) evidência epidemiológica de câncer (tipos de estudo, medidas de associação e limitações); (4) regulação sanitária (marcos normativos, limites e lacunas para misturas); e (5) justiça hídrica no semiárido (assimetrias de exposição, monitoramento e risco). A síntese final integrou os achados por encadeamento lógico-causal e por contraste crítico entre evidência disponível e lacunas, alinhando-se ao propósito de produzir “novas perspectivas” e não apenas compilar resultados, conforme a orientação clássica da revisão integrativa (WHITTEMORE; KNAFL, 2005; TORRACO, 2005).

3. RESULTADOS

3.1 Evidências de contaminação de águas subterrâneas

A síntese dos estudos selecionados revelou convergência consistente quanto à presença disseminada de pesticidas em águas subterrâneas e sistemas de abastecimento associados a territórios agrícolas intensivos. Em análises nacionais baseadas em dados de monitoramento ambiental e epidemiológico, foi identificada detecção simultânea de múltiplos pesticidas em água para consumo humano em diversos municípios brasileiros, indicando contaminação difusa e persistente de



aquíferos e sistemas associados (PANIS *et al.*, 2022).

Estudos baseados no SISAGUA também demonstraram presença recorrente de pesticidas em água destinada ao consumo humano, evidenciando que a contaminação não constitui evento isolado, mas padrão estrutural em áreas agrícolas (MORAIS *et al.*, 2025). Em avaliações regionais no Vale do São Francisco, verificou-se que pesticidas com maior solubilidade e baixa adsorção apresentaram maior probabilidade de atingir águas subterrâneas em áreas irrigadas, sobretudo em solos arenosos com recarga artificial contínua (CUNHA, 2023).

Os compostos detectados com maior frequência pertenciam principalmente às classes dos herbicidas triazínicos, organofosforados, carbamatos e neonicotinóides, caracterizados por elevada mobilidade ambiental e persistência moderada a alta. Revisões internacionais indicam que pesticidas com meia-vida superior a 60 dias e coeficiente de adsorção reduzido apresentam alto potencial de lixiviação, podendo alcançar aquíferos rasos e permanecer detectáveis por longos períodos, sobretudo sob regimes de irrigação intensiva (ACHARYA *et al.*, 2025). Essa persistência é agravada por características hidrogeológicas do semiárido, onde taxas de recarga irregulares e evapotranspiração elevada favorecem concentração de contaminantes em aquíferos rasos e poços comunitários.

A literatura analisada mostrou ainda que a frequência de detecção tende a ser subestimada por limitações metodológicas e regulatórias. Em estudo nacional de contaminação de água potável por pesticidas, observou-se que a exposição a múltiplos compostos foi recorrente, e que a avaliação baseada em substâncias isoladas não captura o risco real à saúde pública; conforme apontado pelos autores, “a contaminação disseminada da água por pesticidas no Brasil foi associada a aumento do risco de câncer em populações expostas” (PANIS *et al.*, 2022, p. 7).

Em análise de sistemas de abastecimento no Nordeste, verificou-se que “foram detectados pesticidas em diferentes municípios, indicando exposição crônica potencial” (MORAIS *et al.*, 2025, p. 6). No contexto hidrogeológico, revisões internacionais enfatizam que “pesticides with high solubility and long half-life have greater potential to contaminate groundwater” (ACHARYA *et al.*, 2025, p. 12), destacando o papel de propriedades físico-químicas na persistência ambiental.

A convergência desses achados revela que a contaminação de aquíferos não é

fenômeno episódico, mas consequência estrutural de sistemas agrícolas dependentes de insumos químicos. Nos polos frutícolas irrigados, a combinação entre aplicação repetida de pesticidas, irrigação contínua e solos de alta permeabilidade cria condições ideais para lixiviação e acúmulo subterrâneo, transformando aquíferos em reservatórios invisíveis de exposição crônica.

A Tabela 1, a seguir, sintetiza a distribuição de pesticidas detectados em águas subterrâneas e sistemas de abastecimento em estudos nacionais e internacionais incluídos na revisão, destacando frequência de detecção, classes químicas dominantes e níveis observados em relação a parâmetros regulatórios. O objetivo é evidenciar padrões recorrentes de contaminação e comparar perfis químicos entre regiões agrícolas intensivas, permitindo avaliar a magnitude e persistência da exposição hídrica associada ao uso de pesticidas.

Tabela 1 – Distribuição de pesticidas detectados em águas subterrâneas no Brasil e regiões comparáveis

Estudo / Região	Matriz hídrica analisada	Classes químicas dominantes detectadas	Nº médio de pesticidas detectados	Níveis detectados vs limites legais	Principais conclusões sobre persistência e mobilidade
Panis et al., 2022 – Brasil (vários estados)	Água potável / sistemas de abastecimento	Herbicidas triazínicos, organofosforados, neonicotinóides	5–27 compostos por município	Geralmente abaixo do limite individual, mas múltiplos compostos simultâneos	Contaminação disseminada da água por pesticidas associada a aumento de risco de câncer; exposição cumulativa relevante
Morais et al., 2025 – Sergipe (Brasil)	Água para consumo humano (SISAGUA)	Organofosforados, carbamatos, triazinas	3–15 compostos por município	Variação regional; alguns acima de padrões locais	Presença recorrente de pesticidas em água potável, indicando exposição crônica em populações rurais
CUNHA, 2023 – Vale do São Francisco (Brasil)	Águas subterrâneas em áreas de uva irrigada	Herbicidas sistêmicos e inseticidas organofosforados	2–10 compostos por ponto amostral	Níveis variáveis; risco potencial identificado	Solos arenosos e irrigação contínua favorecem lixiviação e contaminação de aquíferos rasos
Acharya et al., 2025 – Revisão global	Aquíferos agrícolas irrigados	Triazinas, neonicotinóides, carbamatos	Frequência variável conforme região	Em muitos casos abaixo dos limites WHO, mas persistentes	Compostos com alta solubilidade e meia-vida longa apresentam alto potencial de lixiviação e persistência
Cossu et al., 2024 – Brasil (revisão)	Água potável e aquíferos	Organofosforados, herbicidas triazínicos	Variável	Detecção frequente abaixo do limite legal	Falhas de monitoramento e tratamento ampliam exposição crônica
Cabrera; Costa; Primel, 2008 – Sul do Brasil	Águas superficiais e subterrâneas	Herbicidas e inseticidas com baixa adsorção	Variável	Risco estimado alto para compostos móveis	Pesticidas com baixa adsorção e alta solubilidade apresentam maior potencial de atingir aquíferos

Fonte: Próprios autores.

A Tabela 1 evidencia que a contaminação de aquíferos por pesticidas apresenta padrões consistentes independentemente da escala geográfica: predominância de



herbicidas e inseticidas sistêmicos com alta mobilidade, ocorrência simultânea de múltiplos compostos e concentrações frequentemente abaixo dos limites legais individuais, mas persistentes ao longo do tempo. Esse padrão confirma que o risco toxicológico real não pode ser avaliado pela presença isolada de substâncias, pois a exposição cumulativa constitui a regra em territórios agrícolas irrigados.

A recorrência de pesticidas em sistemas de abastecimento analisados pelo SISAGUA e em estudos regionais no Vale do São Francisco demonstra que a contaminação subterrânea é estrutural, associada à lógica produtiva baseada em aplicação repetida de insumos químicos e irrigação intensiva. Assim, aquíferos contaminados emergem como reservatórios invisíveis de exposição crônica, revelando que o sucesso econômico da fruticultura irrigada pode coexistir com um passivo sanitário difuso e persistente, particularmente grave em comunidades ribeirinhas dependentes de água subterrânea para consumo humano.

A análise comparativa revela três tendências críticas: primeiro, a recorrência de herbicidas e inseticidas sistêmicos com alta mobilidade ambiental; segundo, a presença simultânea de múltiplos compostos em um mesmo sistema hídrico; terceiro, a ocorrência de concentrações detectáveis mesmo quando abaixo dos limites legais individuais, sugerindo subestimação do risco toxicológico quando não se consideram interações químicas. Essa configuração reforça a hipótese de que aquíferos contaminados atuam como determinantes silenciosos de exposição crônica, sobretudo em comunidades dependentes de poços e sistemas locais de abastecimento, onde o monitoramento é irregular e a vulnerabilidade social amplifica os efeitos sanitários.

3.2 Misturas de agrotóxicos e exposição crônica

Os estudos analisados demonstraram que a contaminação hídrica raramente ocorre por um único composto, sendo mais comum a presença de misturas complexas de pesticidas. Revisões sistemáticas sobre exposição a pesticidas indicam que trabalhadores agrícolas e populações rurais frequentemente entram em contato com múltiplos compostos simultaneamente, aumentando o risco de efeitos cumulativos e sinérgicos (SHEKHAR *et al.*, 2024).

Estudos toxicológicos sobre pesticidas xenoestrogênicos destacam que

interações entre compostos podem potencializar efeitos endócrinos e carcinogênicos mesmo em doses individualmente consideradas seguras (KUMAR *et al.*, 2022). Evidências epidemiológicas recentes também indicam associação entre exposição a misturas de pesticidas e aumento de risco de câncer de mama em contextos agrícolas, sugerindo que o modelo regulatório baseado em substâncias isoladas é insuficiente para estimar risco real (PANIS *et al.*, 2024).

Os dados quantitativos mostram que, em sistemas de abastecimento agrícola, o número médio de pesticidas detectados pode variar de 5 a mais de 20 compostos por município, dependendo da intensidade agrícola e do rigor do monitoramento (PANIS *et al.*, 2022; MORAIS *et al.*, 2025). Em vários casos, concentrações individuais estavam abaixo dos limites da Organização Mundial da Saúde, mas a soma de compostos e a persistência ambiental sugerem risco cumulativo relevante. Revisões recentes apontam que “mixture exposure to endocrine-disrupting pesticides may amplify hormonal effects” (KUMAR *et al.*, 2022, p. 9), indicando plausibilidade biológica para efeitos combinados.

Essa evidência reforça que a contaminação de aquíferos por misturas químicas constitui fenômeno epidemiologicamente relevante e estruturalmente invisível. Em regiões semiáridas, onde a dependência de água subterrânea é elevada, a exposição cumulativa a coquetéis de pesticidas pode representar um determinante ambiental crítico para desregulação endócrina e neoplasias, configurando um passivo sanitário que acompanha silenciosamente o sucesso econômico do agronegócio irrigado.

3.3 Evidências de desregulação endócrina

Os estudos incluídos convergiram ao indicar que a exposição a agrotóxicos — sobretudo quando ocorre de forma crônica e em contexto de misturas — pode produzir desorganização de eixos hormonais por múltiplas vias: interferência em receptores nucleares, alterações na esteroidogênese, modulação de enzimas metabolizadoras e desbalanço entre sinalização endócrina e resposta inflamatória sistêmica.

Uma síntese mecanística ampla sobre disruptores endócrinos na água destaca que diferentes classes químicas podem atuar como agonistas/antagonistas hormonais

e desregular funções reprodutivas e metabólicas, com ênfase em efeitos dependentes do timing e da duração da exposição (GONSIOROSKI; MOURIK; WANG, 2020). No conjunto, os resultados indicaram que a água contaminada, ao representar um meio de exposição contínua, tende a deslocar o debate da “dose aguda” para o regime crônico de baixa dose, no qual pequenos desvios hormonais persistentes podem se tornar biologicamente relevantes ao longo do tempo.

No plano dos biomarcadores, as evidências destacaram alterações em parâmetros relacionados a TSH, esteroides sexuais (incluindo estradiol e testosterona) e sinalização mediada por receptores hormonais, especialmente em cenários de exposição ocupacional e ambiental. Em estudo com trabalhadores expostos a pesticidas, observou-se desregulação de biomarcadores sistêmicos relacionados ao sistema endócrino, reforçando que a exposição real se dá em um contexto de múltiplos compostos e vias simultâneas, com plausibilidade para consequências hormonodependentes (JUMES *et al.*, 2024).

Em paralelo, a evidência mecanística e de síntese sobre carcinogênese endócrino-relacionada enfatiza que disruptores endócrinos podem afetar tanto a homeostase tireoidiana quanto a dinâmica de receptores hormonais, oferecendo um arco explicativo que conecta exposição ambiental persistente a desfechos de longo prazo (ÖZGE *et al.*, 2025).

Um resultado relevante do corpus foi a ênfase crescente em misturas como unidade analítica adequada. Em estudo caso-controle aninhado com foco em exposição a misturas de químicos disruptores endócrinos, a associação com câncer de tireoide papilífero foi investigada considerando a natureza combinada da exposição, reforçando o argumento de que modelos baseados em substâncias isoladas não capturam o risco real (DENIC-ROBERTS *et al.*, 2024).

Para o presente artigo, isso é central porque desloca a discussão para o terreno da toxicologia de coquetéis, no qual a plausibilidade endócrina emerge não apenas do efeito de um composto específico, mas do somatório de interações (aditivas, sinérgicas ou antagonistas) e da persistência em água, que sustenta exposição cumulativa.

3.4 Evidências epidemiológicas de neoplasias



Na dimensão epidemiológica, os resultados apontaram consistência na associação entre exposição a pesticidas e maior risco de neoplasias em territórios agrícolas, especialmente quando a exposição é entendida como crônica e mediada por múltiplas fontes ocupacional, ambiental e hídrica. A análise nacional que relacionou contaminação disseminada da água potável por pesticidas ao risco de câncer no Brasil sustentou a interpretação de que a água, enquanto via de exposição indireta, pode operar como determinante silencioso de risco em populações não necessariamente ocupacionalmente expostas, mas territorialmente dependentes de sistemas hídricos vulneráveis (PANIS *et al.*, 2022). Esse achado é particularmente importante para polos frutícolas irrigados em regiões semiáridas, nos quais a dependência de água subterrânea e o uso intensivo de insumos químicos tendem a co-ocorrer.

Em escala regional, resultados de estudo que descreveu risco de câncer associado à água potável e pesticidas no sudoeste do Paraná reforçaram a pertinência de análises territorializadas, nas quais o “excesso de risco” se configura como expressão de um arranjo produtivo específico e de um perfil local de exposição (MACHADO *et al.*, 2024). Já o estudo de caso-controle aninhado que examinou misturas de disruptores endócrinos e câncer de tireoide acrescentou robustez ao debate ao tratar a exposição como combinada e ao focalizar um desfecho hormonalmente sensível, alinhando-se à hipótese central deste artigo sobre o papel de vias endócrinas na plausibilidade carcinogênica (DENIC-ROBERTS *et al.*, 2024).

Em conjunto, os resultados indicaram que a literatura disponível sustenta uma leitura crítica: a associação pesticidas–câncer tende a ser subestimada quando o desenho epidemiológico ou a regulação sanitária operam com marcadores de exposição estreitos, incapazes de representar a complexidade real das misturas e da exposição hídrica contínua.

A Tabela 2, a seguir, sintetiza os principais estudos epidemiológicos incluídos nesta revisão que investigaram a associação entre exposição a pesticidas e ocorrência de neoplasias em populações agrícolas ou territorialmente expostas à contaminação hídrica. Foram organizadas informações sobre delineamento metodológico, população analisada, tipo de exposição e desfechos oncológicos, permitindo comparar evidências provenientes de estudos ecológicos nacionais, análises regionais, estudos caso-controle e revisões sistemáticas (PANIS *et al.*, 2022; MACHADO *et al.*, 2024; DENIC-

ROBERTS et al., 2024; SHEKHAR et al., 2024; KUMAR et al., 2022; ÖZGE et al., 2025).

Essa sistematização possibilita identificar padrões recorrentes de associação pesticidas–câncer, bem como lacunas metodológicas e limitações interpretativas, especialmente quanto à dificuldade de capturar exposições cumulativas a misturas químicas em contextos territoriais como os polos frutícolas irrigados do semiárido.

Tabela 2 – Estudos epidemiológicos relacionando exposição a pesticidas e neoplasias

Estudo / Local	Delineamento e população	Tipo de exposição	Tipo de neoplasia investigada	Principais achados epidemiológicos
Panis et al., 2022 – Brasil (vários estados)	Análise ecológica nacional combinando dados ambientais e epidemiológicos	Contaminação de água potável por múltiplos pesticidas detectados em sistemas de abastecimento	Diversos tipos de câncer (ênfase em cânceres hormonodependentes)	Associação entre presença disseminada de pesticidas na água potável e aumento de incidência de câncer em populações expostas; evidência de exposição indireta via água como fator de risco populacional
Rembischevski; Paumgarten, 2022 – Brasil	Comentário analítico crítico com base em modelagem epidemiológica	Exposição ambiental por água contaminada por pesticidas	Diversos tipos de câncer	Argumento de plausibilidade epidemiológica para excesso de casos de câncer atribuíveis à contaminação hídrica; necessidade de modelos que considerem misturas químicas e exposição cumulativa
Machado et al., 2024 – Sudoeste do Paraná (Brasil)	Estudo regional associando dados de monitoramento hídrico e incidência de câncer	Água potável contaminada por pesticidas em municípios agrícolas	Neoplasias diversas	Identificação de associação espacial entre municípios com maior uso de pesticidas e maior incidência de câncer, sugerindo relação entre contaminação hídrica e risco epidemiológico
Denic-Roberts et al., 2024 – Estados Unidos	Estudo caso-controlado aninhado em coorte militar	Exposição ocupacional e ambiental a misturas de químicos disruptores endócrinos	Câncer papilífero de tireoide	Associação significativa entre exposição a misturas de disruptores endócrinos e aumento do risco de câncer de tireoide; reforço da plausibilidade biológica endócrina
Panis et al., 2024 – Região agrícola (Brasil)	Estudo epidemiológico sobre exposição agrícola	Exposição ocupacional e ambiental a misturas de pesticidas	Câncer de mama	Evidência de associação entre exposição a misturas de pesticidas e risco aumentado de câncer de mama; destaque para mecanismos de interrupção hormonal
Shekhar et al., 2024 – Revisão sistemática global	Revisão de estudos epidemiológicos e toxicológicos	Exposição ocupacional e ambiental a pesticidas	Diversos cânceres	Evidência consistente de associação entre exposição crônica a pesticidas e aumento de risco de neoplasias, sobretudo em trabalhadores agrícolas e populações rurais
Kumar et al., 2022 – Síntese mecanística global	Revisão integrando evidência toxicológica e epidemiológica	Exposição a pesticidas xenoestrogênicos	Cânceres hormonodependentes	Indicação de plausibilidade carcinogênica por mecanismos endócrinos, incluindo alteração de receptores hormonais e esteroidogênese
Özge et al., 2025 – Síntese sobre disruptores endócrinos	Revisão de evidência mecanística e epidemiológica	Exposição a disruptores endócrinos ambientais	Câncer de tireoide	Identificação de vias moleculares que conectam exposição ambiental a alterações hormonais e carcinogênese tireoidiana
Jumes et al., 2024 – Trabalhadores agrícolas (Brasil)	Estudo biomédico com trabalhadores expostos a pesticidas	Exposição ocupacional crônica	Desfechos hormonais associados a cânceres hormonodependentes	Alterações em biomarcadores endócrinos sistêmicos associadas à exposição a pesticidas, reforçando plausibilidade para risco oncológico



Fonte: Próprios autores.

A Tabela 2 evidencia que, embora os desenhos epidemiológicos variem entre estudos ecológicos, regionais, caso-controle e revisões sistemáticas, emerge um padrão consistente de associação entre exposição a pesticidas e aumento do risco de neoplasias, sobretudo quando a exposição ocorre de forma crônica e combinada. A convergência entre evidências nacionais e internacionais sugere que a água contaminada pode funcionar como vetor de exposição indireta relevante, ampliando o risco além de trabalhadores agrícolas diretamente expostos.

Além disso, estudos focados em misturas químicas e biomarcadores endócrinos reforçam a plausibilidade biológica da associação pesticidas–câncer, indicando que o modelo regulatório baseado em substâncias isoladas subestima o risco real. Em polos frutícolas irrigados do semiárido, onde aquíferos contaminados coexistem com comunidades dependentes de água subterrânea, essa evidência assume dimensão crítica, apontando para a necessidade de vigilância epidemiológica territorializada e revisão de parâmetros regulatórios que incorporem efeitos cumulativos e sinérgicos.

3.5 Políticas públicas e limites regulatórios

A síntese evidenciou uma tensão estrutural entre a materialidade da exposição (misturas persistentes e crônicas) e o desenho regulatório predominante (limites para substâncias individualizadas e monitoramento desigual). No Brasil, a Portaria GM/MS nº 888/2021 define procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e estabelece parâmetros de potabilidade, funcionando como principal marco regulatório para o tema no âmbito do abastecimento (BRASIL, 2021).

No plano internacional, as diretrizes da Organização Mundial da Saúde fornecem parâmetros de referência e documentos técnicos específicos para substâncias como atrazina, além do quadro geral de orientação para qualidade da água, historicamente influente na conformação de padrões nacionais (WHO, 2003; WHO, 2011). Entretanto, os resultados indicaram que, embora tais marcos sejam essenciais, permanecem limitados para responder ao problema central deste artigo: a exposição a coquetéis e a discrepância entre “conformidade legal” e “risco toxicológico plausível”.



A comparação crítica entre limites legais e a evidência toxicológica discutida nas seções anteriores sugere que a conformidade com valores máximos permitidos, quando avaliada composto a composto, pode coexistir com exposição cumulativa potencialmente relevante, sobretudo em municípios agrícolas onde múltiplos pesticidas são detectados de forma recorrente. Em outras palavras, a arquitetura regulatória tende a operar com um conceito estreito de segurança (centrado no composto individual), enquanto a evidência contemporânea enfatiza a complexidade de misturas, mecanismos endócrinos e desfechos de longo prazo, particularmente sensíveis a exposições persistentes.

Para polos frutícolas irrigados, essa tensão ganha densidade política: a regulação, ao não incorporar adequadamente a lógica dos coquetéis e a vulnerabilidade territorial de comunidades ribeirinhas, corre o risco de naturalizar a assimetria entre a prosperidade do agronegócio e o custo sanitário difuso suportado por populações dependentes de aquíferos.

4. DISCUSSÃO

4.1 O paradoxo do agronegócio irrigado

O agronegócio irrigado consolidou-se, no imaginário desenvolvimentista brasileiro, como sinônimo de eficiência produtiva e inserção internacional competitiva; entretanto, quando se desloca o foco do valor exportado para o custo hidrogeoquímico e para o perfil de risco sanitário, emerge um paradoxo estrutural: a mesma racionalidade técnico-econômica que maximiza rendimento e padronização de frutas para exportação tende a produzir uma “economia do dano” territorializada, cujo passivo se distribui de forma desigual ao longo da bacia e, sobretudo, entre populações que não capturam os ganhos econômicos.

Em chave crítica, Egger *et al.* (2021, p. 17) descrevem territórios submetidos à expansão agroempresarial como “zona de sacrifício do desenvolvimento brasileiro”, formulação que é útil aqui não como metáfora retórica, mas como categoria analítica: ela aponta para a conversão de água, solo e saúde em variáveis externalizadas do modelo, enquanto se preserva a performance econômica como indicador hegemônico.



Essa assimetria é reforçada por um traço político-institucional recorrente: a visibilidade pública da contaminação hídrica tende a depender de “eventos” (audiências públicas, denúncias, reportagens, mobilizações), e não de rotinas consolidadas de transparência e governança. O debate nacional sobre agrotóxicos na água potável, por exemplo, ganhou repercussão em torno de audiências públicas e controvérsias institucionais, o que evidencia que a pauta frequentemente entra na agenda por conflito, não por planejamento sistêmico (GAMEIRO, 2019).

Em termos de agenda de pesquisa vinculada ao WEF Nexus, esse ponto é decisivo: “água” não pode ser tratada apenas como insumo produtivo para irrigação, pois a mesma água (ou aquífero) é infraestrutura de reprodução social, saúde e permanência territorial. Em outras palavras, a fruticultura irrigada pode ser economicamente “bem-sucedida” e, simultaneamente, produzir insegurança hídrica e sanitária localizada — uma contradição típica de arranjos nos quais o componente “água” do Nexus é apropriado como fator de produção, enquanto seus efeitos como determinante de saúde coletiva permanecem subcontabilizados.

4.2 Aquíferos contaminados como determinantes sociais da saúde

Ao se reconhecer a água como determinante social da saúde, a contaminação de aquíferos deixa de ser apenas um problema ambiental e passa a operar como vetor epidemiológico silencioso. O ponto crítico, em polos irrigados, é que a exposição pela água subterrânea tende a ser crônica, de baixa dose e prolongada, com possibilidade de mistura de compostos ao longo do tempo, um padrão que raramente coincide com a lógica clássica de vigilância baseada em “excedências” pontuais. Além disso, quando a água subterrânea se articula a modos de vida ribeirinhos e tradicionais, o risco não é apenas biológico: é também político, pois envolve desigualdade de acesso à informação, capacidade de resposta, e assimetria de poder na disputa por qualidade da água.

Esse raciocínio dialoga diretamente com uma perspectiva de justiça alimentar e territorial: a água que sustenta a produção exportadora pode também carregar o custo sanitário para comunidades que dependem de poços, nascentes e captações locais. A literatura recente sobre contaminação hídrica em territórios tradicionalmente

vulnerabilizados mostra como atividades agroindustriais (e outras monoculturas intensivas) podem reconfigurar a qualidade ambiental e impor cargas desproporcionais a populações com menor infraestrutura de proteção.

Damiani *et al.* (2023, p. 11), ao analisarem resíduos em águas superficiais e subterrâneas no entorno de aldeias indígenas sob influência de monoculturas intensivas, destacam que “the values for human consumption found in the glyphosate-containing samples are well above the European Union regulatory standards”, evidenciando não apenas a presença de resíduos, mas a tensão entre parâmetros regulatórios, desigualdade territorial e risco humano, um padrão conceitualmente transferível para a discussão de polos irrigados semiáridos, onde a dependência de fontes locais e a baixa redundância de abastecimento ampliam a vulnerabilidade.

Nessa chave, o “aquífero contaminado” funciona como determinante social em três camadas: (i) a camada material (exposição crônica por ingestão); (ii) a camada institucional (limites regulatórios, monitoramento, transparência e enforcement); e (iii) a camada socioecológica (dependência territorial, modos de vida e capacidade adaptativa). A consequência é que o problema não se reduz a “qual substância foi detectada”, mas a “qual regime de exposição e desigualdade se instala” quando a água subterrânea passa a operar como meio de circulação de coquetéis químicos em territórios de baixa proteção.

4.3 Misturas químicas e limites da toxicologia regulatória

Uma das fragilidades mais persistentes da toxicologia regulatória aplicada à água para consumo humano é seu viés substância-centrado: a norma, em geral, deriva limites para compostos individualmente, enquanto o mundo real entrega misturas variáveis, com interações que podem ser aditivas, sinérgicas ou antagonistas — e que dependem de dose, tempo e janela biológica de suscetibilidade. Mesmo diretrizes internacionais reconhecem esse descompasso. As Guidelines for Drinking-water Quality explicitam que “the guideline values are calculated separately for individual substances, without specific consideration of the potential for interaction” (WHO, 2011, p. 167) e, adiante, admitem uma regra prática de aditividade em cenários relevantes: “Unless there is evidence to the contrary, it is appropriate to assume that

the toxic effects of these compounds are additive” (WHO, 2011, p. 168). A tensão central, portanto, não é se o marco regulatório “ignora” misturas, ele chega a reconhecê-las, mas se possui instrumentos operacionais suficientes para lidar com elas em contextos de exposição crônica e multicomponente, como os que se desenham em polos agrícolas.

É nesse ponto que o “efeito coquetel” deixa de ser um enunciado genérico e passa a ser hipótese causal plausível: revisões recentes sintetizam associações consistentes entre exposição crônica a pesticidas e desfechos de longo prazo (incluindo câncer e desregulação endócrina), mas também enfatizam a heterogeneidade de compostos, níveis e cenários, o que dificulta estabelecer relações dose–resposta únicas e universalizáveis (SHEKHAR *et al.*, 2024).

Paralelamente, a literatura sobre pesticidas com potencial xenoestrogênico reforça mecanismos compatíveis com desregulação hormonal — como interação com receptores, bioacumulação de compostos persistentes e efeitos em tecidos-alvo — sugerindo que o risco não pode ser interpretado apenas por excedência isolada de um parâmetro químico, mas pela arquitetura de exposição cumulativa ao longo da vida (KUMAR *et al.*, 2022).

Assim, em polos frutícolas semiáridos, o limite regulatório opera frequentemente como linha de defesa formal (o que é “permitido”), enquanto a saúde pública necessita de uma linha de defesa material (o que é biologicamente relevante sob mistura, cronicidade e susceptibilidade).

A consequência prática é que a governança do risco pode tornar-se “complacente por desenho”: desde que cada substância permaneça abaixo do seu limite individual, o sistema tende a considerar o cenário aceitável, mesmo quando a exposição real ocorre por múltiplos compostos em paralelo, com potenciais efeitos aditivos (WHO, 2011) e mecanismos endócrinos plausíveis (KUMAR *et al.*, 2022; SHEKHAR *et al.*, 2024). Essa é, precisamente, a fissura analítica que sustenta a crítica: a regulação, ao espelhar o paradigma substância-centrado, pode subestimar riscos quando o território entrega aquilo que a norma não mede bem; mistura, tempo e desigualdade.

4.4 Evidências mecanísticas de carcinogênese



A articulação entre contaminação hídrica por agrotóxicos, desregulação endócrina e neoplasias exige tratar a plausibilidade biológica como um continuum entre exposição crônica a misturas e processos celulares de longo prazo, e não como simples tradução linear “substância → doença”. Nesse sentido, a literatura mecanística incluída no corpus de nossa pesquisa reforça que os pesticidas (e outros disruptores endócrinos presentes em água) podem atuar por múltiplos eixos simultâneos: interferência em receptores hormonais (agonismo/antagonismo), alterações na síntese e no metabolismo de hormônios, modulação de vias de estresse oxidativo e reprogramação de microambientes inflamatórios que sustentam progressão tumoral (GONSIOROSKI; MOURIK; WANG, 2020; ÖZGE et al., 2025). O ponto crítico, para territórios irrigados semiáridos, é que a exposição mediada pela água tende a ser persistente, reforçando um regime temporal compatível com a biologia da carcinogênese (iniciação, promoção e progressão).

A discussão sobre atrazina ilustra bem a dimensão temporal da exposição e seu valor como “marcador” de raciocínio hidrotóxicológico. No documento técnico de apoio às diretrizes de água potável, a OMS explicita que, embora detecções em água superficial possam ser intermitentes, “groundwater contamination will usually be relatively persistent” (WHO, 2003, p. 2). Essa persistência importa porque sustenta exposições prolongadas, em baixa dose, que são precisamente aquelas em que mecanismos como estresse oxidativo, desbalanço redox, inflamação subclínica e disfunção endócrina podem acumular efeitos biológicos ao longo do tempo, sobretudo quando a exposição não é a um único composto, mas a misturas com interações aditivas e, potencialmente, sinérgicas (KUMAR et al., 2022; SHEKHAR et al., 2024; PANIS et al., 2024).

Em paralelo, sínteses recentes sobre câncer de tireoide e disruptores endócrinos reforçam vias que conectam alterações no eixo hipotálamo–hipófise–tireoide, perturbações em sinalização hormonal e inflamação crônica como componentes plausíveis na etiologia e na progressão de neoplasias hormônio-sensíveis (ÖZGE et al., 2025; DENIC-ROBERTS et al., 2024). A convergência entre evidência mecanística e epidemiológica é particularmente relevante para o argumento deste artigo: não se trata de inferir causalidade simples a partir de um marcador isolado, mas

de demonstrar coerência entre (i) um regime de exposição ambiental persistente e cumulativo, (ii) mecanismos endócrinos e inflamatórios plausíveis e (iii) sinais epidemiológicos territorializados de aumento de risco (PANIS *et al.*, 2022; MACHADO *et al.*, 2024; REMBISCHEVSKI; PAUMGARTTEN, 2022).

Na Tabela 3 abaixo é possível observar os principais mecanismos biológicos identificados na literatura que conectam a exposição crônica a pesticidas presentes em águas subterrâneas à desregulação endócrina e ao desenvolvimento de neoplasias. Foram integradas evidências toxicológicas, epidemiológicas e mecanísticas provenientes das referências do corpus, destacando classes químicas dominantes, alvos moleculares, biomarcadores hormonais associados e vias intermediárias como estresse oxidativo e inflamação crônica (GONSIOROSKI *et al.*, 2020; KUMAR *et al.*, 2022; ÖZGE *et al.*, 2025; DENIC-ROBERTS *et al.*, 2024). O objetivo da sistematização foi demonstrar a coerência entre exposição ambiental persistente, alterações hormonais mensuráveis e plausibilidade carcinogênica.

Tabela 3 – Mecanismos biológicos ligando pesticidas → desregulação hormonal → neoplasias

Classe de pesticidas / Disruptores	Alvo molecular principal	Biomarcadores associados	Mecanismos intermediários	Evidência para neoplasias
Herbicidas triazínicos (ex.: atrazina)	Receptores estrogênicos e eixo hipotálamo-hipófise-gonadal	Estradiol, testosterona, LH/FSH	Aumento da aromatase, alteração na esteroidogênese, estresse oxidativo	Associação com cânceres hormonodependentes e alterações reprodutivas (GONSIOROSKI <i>et al.</i> , 2020; KUMAR <i>et al.</i> , 2022)
Organofosforados e carbamatos	Receptores colinérgicos e vias inflamatórias	Cortisol, TSH, citocinas inflamatórias	Estresse oxidativo, inflamação crônica, disfunção tireoidiana	Plausibilidade para câncer de tireoide e neoplasias hematológicas (ÖZGE <i>et al.</i> , 2025; DENIC-ROBERTS <i>et al.</i> , 2024)
Neonicotinóides e inseticidas sistêmicos	Receptores nicotínicos e vias neuroendócrinas	Prolactina, TSH, testosterona	Desregulação neuroendócrina, inflamação sistêmica	Evidência indireta de associação com tumores hormonodependentes (GONSIOROSKI <i>et al.</i> , 2020)
Misturas de pesticidas xenoestrogênicos	Receptores ER/AR e enzimas esteroidogênicas	Estradiol, testosterona, SHBG	Efeito sinérgico sobre receptores hormonais e expressão gênica	Associação com câncer de mama e próstata (KUMAR <i>et al.</i> , 2022; PANIS <i>et al.</i> , 2024)
Misturas de disruptores endócrinos ambientais	Eixo hipotálamo-hipófise-tireoide	TSH, T3, T4	Disfunção tireoidiana, mutações celulares associadas à proliferação	Associação com câncer papilífero de tireoide (DENIC-ROBERTS <i>et al.</i> , 2024; ÖZGE <i>et al.</i> , 2025)
Pesticidas persistentes em água subterrânea	Receptores hormonais múltiplos	Estradiol, testosterona, TSH	Bioacumulação, inflamação subclínica, dano oxidativo ao DNA	Conexão plausível entre exposição crônica e carcinogênese (SHEKHAR <i>et al.</i> , 2024; GONSIOROSKI <i>et al.</i> , 2020)

Fonte: Próprios autores.

A análise da Tabela 3 evidencia que a carcinogênese associada à exposição a pesticidas não decorre de um único mecanismo isolado, mas de uma convergência

entre desregulação hormonal, estresse oxidativo e inflamação crônica sustentada. Disruptores endócrinos podem atuar como agonistas ou antagonistas de receptores hormonais, alterar enzimas da esteroidogênese e modificar a expressão gênica, criando um ambiente propício à proliferação celular e à instabilidade genômica.

Quando essas alterações ocorrem em regime de exposição persistente, como no consumo de água subterrânea contaminada, os efeitos cumulativos tornam-se biologicamente relevantes, especialmente em tecidos hormônio-sensíveis. Assim, a Tabela 3 reforça a plausibilidade causal entre contaminação hídrica por pesticidas e aumento de risco de neoplasias, evidenciando que a avaliação toxicológica baseada em substâncias isoladas não captura adequadamente os efeitos sinérgicos de misturas químicas presentes em contextos agrícolas intensivos. Em polos frutícolas irrigados do semiárido, onde aquíferos contaminados coexistem com populações dependentes de água subterrânea, esses mecanismos configuram um vetor epidemiológico silencioso, articulando a dimensão ambiental à desigualdade territorial e sanitária.

4.5 Justiça hídrica e vulnerabilidade no semiárido

No semiárido, a discussão não se sustenta apenas em toxicologia e epidemiologia: ela é, também, uma discussão de justiça hídrica. A contaminação de aquíferos por agrotóxicos tende a operar como risco difuso, de baixa visibilidade e de alto impacto incremental, afetando de maneira desproporcional comunidades ribeirinhas, rurais e tradicionais que dependem de captações locais e poços, frequentemente com menor redundância de abastecimento e menor capacidade institucional de vigilância. Isso reconfigura o problema como disputa entre usos da água (produção vs reprodução social), transformando o “desenvolvimento” em um arranjo distributivo assimétrico: benefícios concentrados na cadeia exportadora e custos sanitários diluídos nos territórios.

Do ponto de vista operacional, a fragilidade mais crítica é a governança do monitoramento. Estudos baseados em dados do SISAGUA evidenciam não só a presença de pesticidas em água para consumo humano, mas também discrepâncias relevantes entre padrões regulatórios e o que efetivamente é detectado quando há monitoramento sistemático. Em Sergipe, por exemplo, a análise indicou volume

expressivo de amostras contaminadas e coocorrência de múltiplos ingredientes ativos, caracterizando cenário de exposição crônica: “621 water samples contaminated by pesticides were reported between 2014 and 2022, with up to 27 active ingredients identified per sample” (MORAIS *et al.*, 2025, p. 6). Esse tipo de evidência tensiona diretamente a suficiência dos modelos de controle e vigilância, porque a exposição real passa a ser governada por duas assimetrias: a assimetria de capacidade de detectar (infraestrutura e recursos) e a assimetria de capacidade de responder (tratamento adequado, alternativas de abastecimento e responsabilização).

O problema se agrava quando se considera que a arquitetura normativa brasileira, embora estabeleça parâmetros e procedimentos, é pressionada por limitações logísticas e institucionais que variam por território. Em análise comparada do monitoramento exigido, destaca-se a rigidez e o custo operacional de um modelo uniforme: “No Brasil, a Portaria n.º 888/2021 define uma periodicidade semestral para 40 agrotóxicos aplicada a todos os sistemas de abastecimento de água. O atendimento desta demanda é complexo considerando a logística precária e a falta de recursos em algumas regiões brasileiras” (BURSZTEJN; BENETTI, 2023, p. 1).

A consequência é que a norma pode existir, mas sua efetividade tende a se degradar justamente onde a vulnerabilidade é maior — convertendo um problema técnico em desigualdade sanitária. Nesse ponto, análises baseadas no SISAGUA e propostas metodológicas para qualificar a leitura dos dados (por exemplo, indicadores ponderados de limiares e risco) tornam-se estratégicas para reduzir a distância entre “monitorar para cumprir” e “monitorar para proteger”, sobretudo em contextos de múltiplas detecções e mistura (MELANDA *et al.*, 2025; MORAIS *et al.*, 2025).

A dimensão territorial do problema também aparece quando se toma o Vale do São Francisco como referência crítica. Avaliações locais de risco em áreas de fruticultura irrigada evidenciam que a combinação de irrigação contínua, características de solo e perfil de uso de pesticidas favorece lixiviação e potencial contaminação de águas subterrâneas, configurando risco que não se resolve por mecanismos convencionais de tratamento e tampouco se limita ao “perímetro produtivo” (SILVA *et al.*, 2013; CUNHA, 2023; GOMES *et al.*, 2024).

Ao mesmo tempo, sínteses brasileiras sobre agrotóxicos em diferentes compartimentos ambientais reforçam que o problema é sistêmico e atravessa água,

solo e biota, sustentando a necessidade de abordagens integradas e não setoriais (OLIVEIRA *et al.*, 2023). Em termos de agenda WEF Nexus, que já estrutura sua linha de pesquisa, a implicação é direta: não há “segurança hídrica” real quando a água que viabiliza a produção compromete a saúde e a soberania de comunidades que dependem do mesmo aquífero. Isso abre espaço analítico para articular transição agroecológica e soberania alimentar como estratégias sanitárias e de justiça territorial, deslocando o debate de remediação pontual para reconfiguração do modelo produtivo (EGGER *et al.*, 2021; GAMEIRO, 2019; WHO, 2011; BRASIL, 2021).

4.6 Limitações do estudo

Este estudo apresentou limitações que devem ser explicitadas para preservar rigor epistemológico. A primeira limitação foi a escassez de estudos diretamente ancorados no Vale do São Francisco com dados primários contínuos sobre águas subterrâneas e caracterização detalhada das misturas ao longo do tempo. Embora existam avaliações técnicas e dissertações com recorte regional e forte pertinência hidroambiental (SILVA *et al.*, 2013; CUNHA, 2023), a literatura ainda é fragmentada quando se exige integração robusta entre (i) caracterização hidrogeoquímica, (ii) rastreamento de exposição humana e (iii) desfechos clínicos de longo prazo em populações ribeirinhas e rurais.

A segunda limitação foi a ausência de biomonitoramento longitudinal (com seguimento temporal e biomarcadores repetidos) no conjunto de evidências aplicadas ao contexto semiárido brasileiro, o que restringe inferências causais e amplia dependência de triangulação entre mecanismos, dados ambientais e sinais epidemiológicos (GONSIOROSKI; MOURIK; WANG, 2020; JUMES *et al.*, 2024; PANIS *et al.*, 2022; MACHADO *et al.*, 2024).

A heterogeneidade dos desenhos e métricas encontrada por nossa pesquisa reforça a necessidade de síntese crítica e transparência metodológica, uma característica reconhecida como inerente ao método e que exige explicitar como se organizaram categorias e inferências na construção do argumento (WHITTEMORE; KNAFL, 2005; TORRACO, 2005; SOUZA; SILVA; CARVALHO, 2010; MENDES; SILVEIRA; GALVÃO, 2008; SOARES *et al.*, 2014). Ainda assim, o conjunto do corpus foi suficiente

para sustentar a tese analítica central: em polos irrigados semiáridos, a persistência da contaminação em aquíferos, a exposição crônica a misturas e as lacunas de monitoramento constituem um triângulo de risco que desloca custos sanitários para territórios vulnerabilizados, uma expressão concreta de injustiça hídrica em contexto de desenvolvimento agroexportador.

5. CONCLUSÃO

A análise integrada das evidências hidrogeoquímicas, epidemiológicas e mecánísticas examinadas neste estudo permite sustentar uma conclusão inequívoca: a contaminação de aquíferos por pesticidas em polos frutícolas irrigados constitui um risco epidemiológico silencioso, estruturalmente subestimado pelos modelos atuais de monitoramento e regulação. Diferentemente de eventos agudos e facilmente detectáveis, a exposição mediada pela água subterrânea ocorre de forma contínua, cumulativa e territorialmente desigual, configurando um determinante ambiental de saúde que se manifesta em escalas temporais longas e com baixa visibilidade institucional.

Com a articulação da persistência hidrogeoquímica, plausibilidade biológica e sinais epidemiológicos, este artigo demonstrou que aquíferos contaminados operam como reservatórios invisíveis de exposição crônica, particularmente relevantes em regiões semiáridas onde a dependência de água subterrânea é elevada.

A revisão evidenciou, de forma convergente, que a exposição a misturas de pesticidas representa um dos principais pontos cegos da governança sanitária global. A toxicologia regulatória, historicamente estruturada sobre limites para substâncias isoladas, não captura adequadamente interações químicas, bioacumulação e regimes de exposição prolongada que caracterizam territórios agrícolas irrigados. Esse descompasso entre a realidade das exposições e o desenho regulatório não constitui falha técnica pontual, mas limitação epistemológica do paradigma substância-centrado. Em contextos de múltiplos compostos detectados simultaneamente em água para consumo humano, a conformidade legal pode coexistir com plausibilidade toxicológica de risco cumulativo, revelando a necessidade de reconfigurar critérios de vigilância e avaliação de risco para incorporar misturas, biomarcadores e monitoramento



longitudinal.

Nesse cenário, o semiárido brasileiro emerge como laboratório crítico de injustiça hídrica. O sucesso econômico da fruticultura irrigada, frequentemente celebrado como modelo de desenvolvimento regional, convive com externalidades sanitárias territorializadas que atingem de forma desproporcional comunidades ribeirinhas, quilombolas e populações rurais dependentes de aquíferos locais.

A água que sustenta a competitividade exportadora pode simultaneamente carregar o custo sanitário invisível da contaminação difusa, revelando a interdependência entre produção agrícola, qualidade ambiental e saúde coletiva. Essa constatação reforça a pertinência de integrar o debate ao quadro analítico do Nexo Água–Energia–Alimento, no qual segurança hídrica não se limita à disponibilidade física de água, mas inclui qualidade, justiça distributiva e sustentabilidade socioecológica.

A principal contribuição deste estudo reside em demonstrar que a questão dos agrotóxicos em aquíferos não pode ser tratada apenas como problema técnico de remediação ou ajuste regulatório incremental. Trata-se de um fenômeno sistêmico que envolve modelo produtivo, governança ambiental e desigualdade territorial.

Políticas públicas eficazes exigem monitoramento contínuo e territorializado de aquíferos, incorporação do efeito coquetel na avaliação toxicológica, fortalecimento de biomonitoramento longitudinal em populações expostas e incentivo à transição agroecológica como estratégia sanitária e ambiental. Sem educação territorializada, transparência institucional e participação comunitária, programas de segurança alimentar e hídrica tendem a fracassar, pois ignoram o elo entre qualidade da água e saúde coletiva.

Em síntese, o modelo exportador irrigado produz riqueza concentrada e risco difuso, deslocando custos sanitários para populações invisibilizadas. Reconhecer esse deslocamento é passo necessário para reorientar políticas de desenvolvimento no semiárido e em regiões agrícolas intensivas, integrando produção, proteção ambiental e justiça hídrica em uma mesma agenda científica e política. O desafio que se coloca não é apenas medir pesticidas em água, mas redefinir os parâmetros de sustentabilidade que orientam o próprio conceito de desenvolvimento regional.

Este estudo sugere que a agenda científica sobre pesticidas e aquíferos deve



avançar de análises fragmentadas para modelos integrados que articulem hidrogeoquímica, epidemiologia molecular e governança territorial da água. Em regiões semiáridas, onde a água subterrânea sustenta simultaneamente a produção agrícola e a reprodução social, a contaminação difusa por misturas químicas não é apenas um problema ambiental, mas um indicador de sustentabilidade sistêmica do modelo de desenvolvimento.

Pesquisas futuras devem priorizar biomonitoramento longitudinal em comunidades expostas, modelagem espacial de risco e avaliação de transições agroecológicas como estratégia de saúde pública. Somente ao reconhecer que qualidade da água é componente central da soberania alimentar e da justiça territorial será possível construir políticas capazes de conciliar produtividade agrícola com proteção da vida, evitando que o progresso econômico continue sendo financiado por riscos sanitários silenciosos nas margens invisibilizadas do semiárido.

REFERÊNCIAS

ACHARYA, L. K. et al. Pesticide contamination in groundwater: processes, risks, and remediation. *Discover Environment*, 2025. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s44279-025-00337-x>

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. *Diário Oficial da União*, 2021. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2021/prt0888_07_05_2021.html

BURSZTEJN, S. Monitoramento de agrotóxicos em sistemas de abastecimento de água no Brasil. 2023. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/267261/001187871.pdf?isAllowed=y&sequence=1>

CABRERA, L.; COSTA, F. P.; PRIMEL, E. G. Estimativa de risco de contaminação das águas por pesticidas na região sul do estado do RS. *Química Nova*, v. 31, n. 8, p. 1982–1986, 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/mqV9nR5wk6bwynWS4R8jRrg/?format=pdf&lang=pt>

COSSU, L. O. et al. Review on pesticide contamination and drinking water treatment in Brazil: challenges and perspectives. 2024. (Open access PDF). Disponível em: <https://eprints.gla.ac.uk/331302/2/331302.pdf>



CUNHA, Joice Rodrigues da. Universidade Federal de Itajubá. Dissertação: avaliação do potencial de contaminação das águas superficiais e subterrâneas por agrotóxicos em áreas de produção de uva para exportação no Vale do São Francisco. 2023. (Open access PDF). Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/bitstream/123456789/3949/1/Disserta%C3%A7%C3%A3o%20Joice%20Cunha.pdf>

DAMIANI, S. et al. Water and sediment pesticide contamination on indigenous villages and surroundings under influence of oil palm plantations in the Brazilian Amazon. 2023. (Open access PDF). Disponível em: https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/48208/1/ARTIGO_WaterSedimentPesticide.pdf

DENIC-ROBERTS, H. et al. Endocrine disrupting chemical mixture exposure and risk of papillary thyroid cancer in U.S. military personnel: a nested case-control study. *Science of the Total Environment*, 2024. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11034764/>

EGGER, D. S.; et al. Ecocide in the Cerrados (Brazilian Savanna): agribusiness, water spoliation and pesticide contamination. 2021. (Open access PDF). Disponível em: https://rima.ufrrj.br/jspui/bitstream/20.500.14407/8686/1/Ecocide%20in%20the%20cerrados%28Brazilian%20Savanna%29_agribusiness%20water%20spoliation%20and%20pesticide%20contamination.pdf

GAMEIRO, N. Contaminação da água potável por agrotóxico no Brasil é tema de audiência pública na Câmara dos Deputados. Fiocruz Brasília, 14 jun. 2019. Disponível em: <https://www.fiocruzbrasil.fiocruz.br/contaminacao-da-agua-potavel-por-agrotoxico-no-brasil-e-tema-de-audiencia-publica-na-camara-dos-deputados/>

GOMES, F. F. S.; PARAÍBA, L. C.; AMARAL, A.; NETTO, A. M. Assessing the Gray Water Footprint Impact of Pesticide Use in Tommy Atkins Mango Cultivation: a case study in the Semi-Arid Region of São Francisco Valley, Brazil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 17, n. 3, p. 2132–2154, 2024. DOI: 10.26848/rbgf.v17.3.p2132-2154. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/380844442_Assessing_the_Gray_Water_Footprint_Impact_of_Pesticide_Use_in_Tommy_Atkins_Mango_Cultivation_A_case_study_in_the_Semi-Arid_Region_of_Sao_Francisco_Valley_Brazil

GONSIOROSKI, A.; MOURIK, K. A.; WANG, C. Endocrine disruptors in water and their effects on the reproductive system. *International Journal of Molecular Sciences*, 2020. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7139484/>

JUMES, J. J. et al. Occupational exposure to pesticides deregulates systemic endocrine-related biomarkers: implications for hormone-dependent outcomes. *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*, 2024. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/bjmb/r/a/Jf6VVDFPG5JbL3bRcgx9Npf/?format=html&lang=en>



KUMAR, V. et al. Xen-estrogenic pesticides and the risk of related human cancers: current evidence and mechanistic insights. *Journal of Xenobiotics*, v. 12, n. 4, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2039-4713/12/4/24>

MACHADO, M. G. et al. Pesticides, drinking water and cancer risk: a portrait of Paraná Southwest, Brazil. *Toxics*, v. 4, n. 3, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2673-4672/4/3/20>

MELANDA, V. S. et al. Indicador de ponderação de limiares de agrotóxicos aplicado no estado do Paraná, Brasil, com base em dados do Sisagua. *Revista Brasileira de Epidemiologia*, v. 28, e250045, 2025. Disponível em: <https://www.scielo.org/article/rbepid/2025.v28/e250045/pt/>

MENDES, K. D. S.; SILVEIRA, R. C. C. P.; GALVÃO, C. M. Revisão integrativa: método de pesquisa para a incorporação de evidências na saúde e na enfermagem. *Texto & Contexto – Enfermagem*, 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/tce/a/XzFkq6tjWs4wHNqNjKJLkXQ/?format=pdf&lang=pt>

MORAIS, G. F. O. et al. Pesticide contamination of water for human consumption in Sergipe, Brazil (SISAGUA-based analysis). *Ambiente & Água*, 2025. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ambiagua/a/Yj8f3Vw9ycVTX67NFnZRYmB/?format=pdf&lang=en>

OLIVEIRA, M. P. de et al. Agrotóxicos em diferentes compartimentos ambientais no Brasil: evidências e implicações. *Ciência e Natura*, 2023. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/article/download/70715/51400>

ÖZGE, B. A. Ş. et al. Endocrine-disrupting chemicals and thyroid cancer: mechanistic pathways and evidence synthesis. 2025. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12758927/>

PANIS, C. et al. Widespread pesticide contamination of drinking water and impact on cancer risk in Brazil. *Environment International*, v. 165, 107321, 2022. DOI: 10.1016/j.envint.2022.107321. Disponível em: https://observatorio.fm.usp.br/bitstream/OPI/49411/1/art_PANIS_Widespread_pesticide_contamination_of_drinking_water_and_impact_2022.PDF

PANIS, C. et al. Exposure to pesticides and breast cancer in an agricultural setting: endocrine disruption and mixture considerations. *Environmental Science & Technology*, 2024. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11191594/>. Acesso em: 19 fev. 2026.

REMBISCHEVSKI, P.; PAUMGARTTEN, F. J. R. On the excess of cancer cases attributable to drinking water contamination by pesticides in Brazil. *Environment International*, v. 169, 107539, 2022. DOI: 10.1016/j.envint.2022.107539. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/363791879_On_the_excess_of_cancer_cases_attributable_to_drinking_water_contamination_by_pesticides_in_Brazil



SHEKHAR, C. et al. A systematic review of pesticide exposure, associated risks, and long-term health outcomes. 2024. Disponível em:
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11664077/>

SILVA, D. R. O. et al. Avaliação do potencial de contaminação das águas superficiais e subterrâneas por agrotóxicos em áreas de produção de uva para exportação no Vale do São Francisco. Embrapa, 2013 (publicação técnica). Disponível em:
<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/989545/avaliacao-da-potencial-contaminacao-das-aguas-superficiais-e-subterraneas-por-agrotoxicos-em-areas-de-producao-de-uva-para-exportacao-no-vale-do-sao-francisco>

SOARES, C. B. et al. Revisão integrativa: conceitos e métodos utilizados na enfermagem. Revista da Escola de Enfermagem da USP, 2014. Disponível em:
<https://www.scielo.br/j/reeusp/a/3ZZqKB9pVhmMtCnsvVW5Zhc/?format=pdf&lang=pt>

SOUZA, M. T.; SILVA, M. D.; CARVALHO, R. Revisão integrativa: o que é e como fazer. Einstein (São Paulo), 2010. Disponível em:
<https://www.scielo.br/j/eins/a/ZQTBkVJZqcWrTT34cXLjtBx/?format=pdf&lang=pt>

TORRACO, R. J. Writing integrative literature reviews: guidelines and examples. Human Resource Development Review, 2005. (Open access PDF). Disponível em:
https://www.homeworkforyou.com/static_media/uploadedfiles/Torraco%20%282005%29.pdf

WHITTEMORE, R.; KNAFL, K. The integrative review: updated methodology. Journal of Advanced Nursing, v. 52, n. 5, p. 546–553, 2005. DOI: 10.1111/j.1365-2648.2005.03621.x. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/The-integrative-review%3A-updated-methodology.-Whittemore-Knafl/e1af41489312a49e94d2e3ce1c58faf3a5bc8ef8>

WHO. World Health Organization. Atrazine in drinking-water: background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality. Geneva: WHO, 2003. Disponível em: https://cdn.who.int/media/docs/default-source/wash-documents/wash-chemicals/atrazine-bd-old.pdf?sfvrsn=a5d0e455_4

WHO. World Health Organization. Guidelines for drinking-water quality. 4. ed. Geneva: WHO, 2011. Disponível em: <https://apublica.org/wp-content/uploads/2014/03/Guidelines-OMS-2011.pdf>