

VI-1102 – AGROTÓXICOS PRIORITÁRIOS PARA O MONITORAMENTO NOS MANANCIAIS COM BASE NA DINÂMICA AMBIENTAL

Taciane de Oliveira Gomes de Assunção⁽¹⁾

Engenheira Ambiental e Sanitarista pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Mestranda em Engenharia Civil pela UFJF.

Pyetra Basile Catão⁽²⁾

Graduanda em Engenharia Ambiental e Sanitária pela UFJF.

Fernanda Bento Rosa Gomes⁽³⁾

Engenheira Ambiental e Sanitarista pela UFJF. Mestranda em Engenharia Civil pela UFJF.

Renata de Oliveira Pereira⁽⁴⁾

Engenheira Ambiental pela Universidade Federal de Viçosa (UFV). Mestre em Engenharia Civil pela UFV. Doutora em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Universidade de São Paulo (USP). Professora associada do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFJF. Professora efetiva do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PEC) da UFJF.

Endereço⁽¹⁾: Rua José Lourenço Kelmer, s/n - Martelos – Juiz de Fora - MG - CEP: 36036-330 - Brasil - e-mail: taciane.assuncao@engenharia.ufjf.br

RESUMO

Dada a relevância da agricultura no contexto econômico brasileiro, tem-se, paralelamente, uma intensa utilização de agrotóxicos no país. Em vista disso, tem-se um iminente risco ao meio ambiente e à saúde humana, em especial no que se refere à contaminação de solos, águas subterrâneas e superficiais e, conseqüentemente, à exposição humana a tais compostos. Assim sendo, o presente estudo teve o objetivo de propor uma lista de ingredientes ativos de agrotóxicos (IAs) prioritários para o monitoramento em mananciais de abastecimento de água no Brasil, pautando-se na avaliação da dinâmica ambiental dos compostos comercializados no Brasil no período de 2009 a 2020 e que são autorizados para uso no país. A partir dos relatórios de vendas de ingredientes químicos e bioquímicos disponibilizados pelo IBAMA, foram identificados 322 compostos com vendas reportadas no período em estudo, sendo 271 IAs de agrotóxicos. Com base no estudo da dinâmica ambiental de cada composto, foram listados 190 IAs que possuem potencial de contaminação de mananciais, sendo que nove são regulamentados pela portaria de potabilidade da água para consumo humano. Além disso, foi identificada a comercialização de 32 IAs que apresentam potencial carcinogênico, sendo que 20 desses compostos possuem dinâmica ambiental favorável à contaminação de mananciais de abastecimento. Os resultados evidenciam a necessidade de monitoramento sistemático de agrotóxicos nos mananciais de abastecimento, bem como de estudos que relacionem a toxicidade e os riscos associados à exposição da população aos agrotóxicos prioritários listados no presente estudo.

PALAVRAS-CHAVE: Água, agricultura, contaminação, pesticidas, vendas.

INTRODUÇÃO

Os agrotóxicos são definidos como substâncias químicas capazes de controlar, exterminar ou inibir a proliferação de insetos, pragas e plantas daninhas (MORAES, 2019). Nesse sentido, são empregados em plantações, a fim de diminuir as infestações de pragas e proteger as colheitas, evitando possíveis perdas de safra e diminuição da qualidade dos produtos (RANI *et al.*, 2021). Contudo, a utilização dessas substâncias em larga escala ou sem o devido manejo pode acarretar conseqüências para o ambiente e à saúde humana (MORAES, 2019).

Dentre os impactos dos agrotóxicos ao meio ambiente, destaca-se a contaminação de solos, águas subterrâneas e superficiais (LOPES & ALBUQUERQUE, 2018). As conseqüências à saúde humana são variáveis, podendo ser imediatas (efeito agudo) ou de longo prazo (efeito crônico) (MAHMOOD *et al.*, 2016). Os efeitos agudos e

crônicos podem incluir intoxicação dos trabalhadores, perda auditiva, nascimentos prematuros, alterações nos sistemas reprodutores masculino e feminino e alguns tipos de cânceres (LOPES & ALBUQUERQUE, 2018).

Diante desse cenário, a análise sobre a dinâmica ambiental dos agrotóxicos é extremamente importante na avaliação da possibilidade de exposição dos seres humanos a essas substâncias, ou seja, do potencial de contaminação das diferentes matrizes ambientais (ar, solos e águas), assim como da persistência desses compostos no ambiente (VALARINI *et al.*, 1998; ASSUNÇÃO *et al.*, 2020). Por meio desse estudo, é possível determinar a mobilidade de um determinado agrotóxico no solo, sua capacidade de se volatilizar e estar presente na atmosfera ou de atingir mananciais de abastecimento, sejam esses superficiais ou subterrâneos (ASSUNÇÃO *et al.*, 2020).

Além disso, destaca-se que a dinâmica ambiental dos pesticidas é regulada sobremaneira pelo seu comportamento no solo. Nessa matriz, os agrotóxicos estão sujeitos a processos físico-químicos e biológicos como adsorção, absorção e mobilidade através do perfil do solo, a depender da concentração e das propriedades físico-químicas de cada composto, do tipo de solo e das condições climáticas locais (SILVA *et al.*, 2022). Dessa forma, por meio da combinação desses fatores, é possível prever se um determinado composto tende a ficar adsorvido no solo ou tende a se desprender dessa matriz, sendo passível de sofrer escoamento superficial ou lixiviação, fornecendo, portanto, um bom indicativo do potencial de contaminação de diferentes compartimentos ambientais.

OBJETIVOS

O presente trabalho tem por objetivo avaliar e discutir a dinâmica ambiental dos ingredientes ativos (IAs) de agrotóxicos que possuem comercialização no período de 2009 a 2020 e que são autorizados para uso no Brasil, de forma a propor uma lista de compostos prioritários para o monitoramento em mananciais de abastecimento de água, com base nos riscos potenciais de contaminação.

MATERIAIS E MÉTODOS

A comercialização de agrotóxicos no Brasil foi analisada por meio de relatórios de vendas disponibilizados anualmente pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), compreendendo os anos de 2009 a 2020 (IBAMA, 2022). Ressalta-se que o órgão só disponibiliza os dados de um determinado composto se houverem ao menos três empresas que possuam o registro daquele princípio ativo. A partir da lista de compostos vendidos, realizou-se uma triagem, excluindo-se os compostos classificados como adjuvantes, agentes microbiológicos, inorgânicos, feromônios sintéticos, hormônios vegetais e proibidos. Com o quantitativo vendido de IA remanescente, realizou-se o cálculo de médias anuais considerando os anos em que os compostos obtiveram vendas reportadas para o Brasil. Ademais, foram consultadas as monografias da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) a fim de verificar se os IAs vendidos possuem autorização de uso no Brasil e, sendo o composto autorizado, quais usos são permitidos (ANVISA, 2023).

Para os compostos remanescentes da etapa de triagem, foi realizada a etapa de análise da dinâmica ambiental. Essa etapa baseou-se nos seguintes parâmetros (IUPAC, 2022):

- tempo de meia vida (DT_{50}) em água, em solo e devido à hidrólise;
- coeficiente de adsorção ao carbono orgânico do solo (K_{oc});
- constante de Henry adimensional (KH');
- coeficiente de partição octanol/água (K_{ow}); e
- relação KH'/K_{ow} .

Além disso, a probabilidade de contaminação de águas superficiais e subterrâneas foi determinada segundo os índices de GOSS e GUS (*Groundwater Ubiquity Score*), respectivamente (GOSS, 1992; GUSTAFSON, 1989). Os dados primários correspondentes a esses parâmetros foram obtidos na base de dados *Pesticide properties database* (IUPAC, 2022).

A análise da dinâmica ambiental pautou-se em sete critérios de exclusão, que levam em consideração os parâmetros e índices supramencionados para a definição da probabilidade de contaminação de mananciais superficiais ou subterrâneos. Destaca-se que, nessa análise, os IAs de agrotóxicos que não foram eliminados

por nenhum dos critérios apresentam maior potencial de contaminação. Os critérios de exclusão utilizados foram adaptados de Bastos *et al.* (2020) e estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Critérios de avaliação da presença potencial de agrotóxicos em águas.

Critério de Exclusão		Interpretação
1	$DT_{50} \text{ água} < 1 \text{ dia}^{(a)}$	Indica elevado potencial de degradação em água. ^(a)
2	$Koc > 4000 \text{ mL/g}$ e $DT_{50} \text{ solo} \leq 30 \text{ dias}$	Indica que o composto é imóvel no solo e possui potencial de se degradar no mesmo.
3	$500 \text{ mL/g} < Koc \leq 4000 \text{ mL/g}$ e $DT_{50} \text{ solo} \leq 10 \text{ dias}$	Indica elevado potencial de adsorção ao solo e baixo tempo de meia vida no solo.
4	$Koc \leq 75 \text{ mL/g}$ e $DT_{50} \text{ água}$ ou $DT_{50} \text{ hidrólise} \leq 10 \text{ dias}$	Indica baixo potencial de adsorção ao solo e baixo tempo de meia vida na água.
5	$75 \text{ mL/g} < Koc \leq 500 \text{ mL/g}$ e $DT_{50} \text{ água}$ ou $DT_{50} \text{ hidrólise} \leq 10 \text{ dias}$ e $DT_{50} \text{ solo} \leq 10 \text{ dias}$	Indica potencial intermediário de adsorção ao solo e baixo tempo de meia vida, tanto na água quanto no solo.
6	$KH' > 10^{-4}$ e $KH'/Kow > 10^{-9}$	Indicam baixa probabilidade de um composto ser encontrado na água devido à elevada volatilidade.
7	Índice de GOSS dissolvido em água e GUS baixos e GOSS associado ao solo e sedimento baixo ou médio	Indicam baixo potencial de lixiviação (GUS), baixo potencial de transporte devido à dissolução na água (GOSS) e baixo ou médio potencial de transporte associado ao sedimento (GOSS).

Fonte: adaptado de Bastos *et al.* (2020); (a) IUPAC (2022).

Destaca-se que para os compostos excluídos pelos critérios de dinâmica ambiental e remanescentes foram realizadas verificações quanto à carcinogenicidade junto às monografias da *International Agency for Research on Cancer* (IARC) (IARC, 2022) e da *United States Environmental Protection Agency* (USEPA) (USEPA, 2018). Com base na lista da IARC (2022) foram selecionados os princípios ativos classificados como grupo 1 – carcinogênico humano, grupo 2A – provável carcinogênico humano e grupo 2B – possível carcinogênico humano. Já com base na lista da USEPA (2018), foram selecionados aqueles classificados como: conhecido carcinogênico humano e provável carcinogênico humano. Ressalta-se que tal verificação se faz necessária por não existir um limiar seguro para a saúde humana para os compostos com potencial carcinogênico (WHO, 2022; SCHLINKER, 2022).

Adicionalmente, os dados de todos os IAs vendidos em cada estado brasileiro e não excluídos pelos critérios anteriormente descritos foram representados espacialmente, considerando o ano de 2020 como ano base. Além disso, utilizou-se o teste de Mann-Kendall ($\alpha=0,05$) para avaliar a existência de tendências temporais significativas nas vendas dos cinco IAs mais vendidos e não excluídos em cada macrorregião do país, considerando o período de 2009 a 2020 como referência para tal análise.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Avaliação da dinâmica ambiental dos agrotóxicos comercializados no Brasil entre 2009 e 2020

A partir dos relatórios de comercialização de ingredientes químicos e bioquímicos disponibilizados pelo IBAMA (2022), identificaram-se 322 compostos com vendas reportadas entre 2009 e 2020. Desses, 51 foram excluídos por serem classificados como adjuvantes, agentes microbiológicos, compostos inorgânicos, feromônios sintéticos, hormônios vegetais ou proibidos. Logo, os critérios de avaliação de dinâmica ambiental foram aplicados para 271 IAs (Tabela 2).

Destaca-se que, uma vez que o composto foi excluído por um critério de dinâmica ambiental, esse não foi avaliado pelos demais critérios. No total, 29,9% dos IAs avaliados segundo os critérios de dinâmica ambiental

foram excluídos pelos sete critérios, assim sendo, verificou-se que 190 compostos comercializados e autorizados para uso no Brasil possuem potencial de contaminação de mananciais. Ressalta-se que dos 190 IAs, não foram encontrados valores de Koc, DT₅₀ no solo, DT₅₀ em água e DT₅₀ devido à hidrólise, respectivamente, para 67, 9, 56 e 27 IAs, que, portanto, não foram excluídos pelos critérios por falta de informações.

Tabela 2. Resultados obtidos após a aplicação dos critérios de dinâmica ambiental.

Descrição	Nº de IAs	Ingredientes ativos
Total de IAs analisados	271	-
IAs excluídos pelo critério 1	28	mancozebe, malationa, sulfentrazone, procimidona, captana, haloxifope-p-metílico, zeta-cipermetrina, lambda-cialotrina, cimoxanil, carfentrazone-etílica, fluasifope-p-butílico, isoxaflutol, fenoxapropo-p-etílico, cresoxim-metílico, espiromesifeno, espiroclorfenol, novalurum, folpete, cloridrato de formetanato, famoxadona, clodinafopropargil, cloreto de cloromequate, quizalofoprop-terfúrico, cialofoprop-butílico, dazomete, ditianona, dodina, flufenoxurum.
IAs excluídos pelo critério 2	24	cletodim, metiram, fluazinam, clorfenapir, bifentrina, cipermetrina, alfa-cipermetrina, diafentiurom, abamectina, beta-ciflutrina, diflubenzurum, benfuracarbe, espinetoram, ciflumetofem, etofenprox, lactofem, fluoxipir-metílico, piriproxi, permetrina, espinosade, gama-cialotrina, fenoxapropo-etílico, imibenconazol, tolfenpirade.
IAs excluídos pelo critério 3	9	tiofanato-metílico, clorotalonil, profenofós, fenitrotiona, glufosinato-sal de amônio, fosmete, zoxamida, terbufós, amitraz.
IAs excluídos pelo critério 4	6	metam sódico, flumicloraque-pentílico, metomil, imazetapir, imazapir, cianamida.
IAs excluídos pelo critério 5	2	acetamiprido, metidationa.
IAs excluídos pelo critério 6	10	clorpirifós, fenpropatrina, trifluralina, pendimentalina, brometo de metila, flumetralina, decanol, etridiazol, florpiraxifen-benzil, propaquizafop.
IAs excluídos pelo critério 7	2	oxifluorfem, triflumurum.

IA: ingrediente ativo. Fonte: Autoria própria (2022).

Conforme apresentado na Tabela 2, 28 IAs foram excluídos pelo critério 1, o que significa que esses compostos apresentam um alto potencial de degradação em águas, já que possuem tempo de meia vida inferior a um dia nessa matriz (IUPAC, 2022). Logo, acredita-se que os IAs excluídos por esse critério possuem baixa probabilidade de serem encontrados na água de consumo humano.

24 IAs foram excluídos pelo critério 2, indicando que possuem imobilidade no solo e alto potencial de degradação nessa matriz. Tais compostos possuem, portanto, baixa probabilidade de ocorrência em mananciais, pois tendem a se ligar ao carbono orgânico do solo e, como possuem baixo DT₅₀ no solo, são de rápida degradação nessa matriz (MOTTA *et al.*, 2022; ASSUNÇÃO *et al.*, 2020).

O critério 3 excluiu nove IAs por possuírem elevada adsorção ao solo e rápida degradação nessa matriz. Seis IAs foram excluídos pelo critério 4, pois apesar de possuírem mobilidade no solo, quando atingem as águas superficiais ou subterrâneas, são de rápida degradação nessas matrizes. Já o critério 5 excluiu dois IAs por possuírem mobilidade no solo moderada e rápida degradação tanto em águas quanto no solo, ou seja, independente da matriz em que o composto estiver, esse tem um elevado potencial de degradação.

O critério 6 excluiu nove IAs por apresentarem elevada volatilidade e, portanto, apresentarem baixo potencial de serem encontrados em águas. É importante ressaltar que IAs que apresentam um KH' elevado possuem

maior tendência de se volatilizarem. No entanto, caso apresentem altos valores de Koc, tais compostos tendem a possuir forte sorção aos sólidos e, portanto, mobilidade reduzida (MOTTA *et al.*, 2022).

O critério 7 excluiu dois IAs com baixa probabilidade de lixiviação, baixo potencial de transporte devido sua dissolução em água e baixo ou moderado potencial de transporte associado ao sedimento, considerando o índice de GUS e o método de GOSS. Assim, foram excluídos IAs que possuem mobilidade reduzida por apresentarem solubilidade baixa e alta adsorção ao solo, aliada a rápida degradação no solo (baixo DT₅₀ nessa matriz) (MOTTA *et al.*, 2022).

Verificação do potencial carcinogênico dos compostos comercializados no Brasil entre 2009 e 2020

As listas da IARC (2022) e USEPA (2018) foram verificadas quanto ao potencial carcinogênico dos 271 IAs de agrotóxicos que foram avaliados pelos critérios de dinâmica ambiental. Dos 190 IAs que possuem potencial de contaminação de mananciais, ou seja, que não foram excluídos por nenhum dos critérios de dinâmica ambiental, 20 IAs possuem potencial carcinogênico. Desses, a IARC (2022) considera que o glifosato (classe 2A) e 2,4-D (classe 2B) possuem potencial carcinogênico. Já segundo a USEPA (2018), glifosato é classificado como provável não carcinogênico humano, enquanto o 2,4-D é classificado como não carcinogênico. Destaca-se que glifosato e 2,4-D possuem valores máximos permitidos (VMPs) estabelecidos pela Portaria GM/MS n° 888/2021, que dispõe sobre o padrão brasileiro de potabilidade da água para consumo humano e, portanto, devem ser monitorados em mananciais de abastecimento e na água potável. Seus respectivos VMPs são 500 µg/L e 30 µg/L (BRASIL, 2021).

Os outros 18 IAs que apresentam probabilidade de contaminação de mananciais de abastecimento e potencial carcinogênico pela USEPA (2018) são: diurom, tiodicarbe, epoxiconazol, propinebe, hidróxido de fentina, propargito, cresoxim-metílico, iprodiona, tiabendazol, carbaril, tiacloprido, alacloro, bentiavalicarbe isopropílico, pimetrozina, hexitiazoxi, imazalil, oxadiazona e etridiazol. Diurom é classificado pela USEPA (2018) como conhecido/provável carcinogênico humano e os demais como prováveis carcinogênicos para humanos. Desses, cinco IAs possuem VMPs estabelecidos no padrão brasileiro de potabilidade da água, sendo eles: diurom (20 µg/L), tiodicarbe (90 µg/L), epoxiconazol (60 µg/L), propargito (30 µg/L) e alacloro (20 µg/L) (BRASIL, 2021).

Além disso, para cada IA excluído também foi verificada a classificação carcinogênica nas listas da IARC (2022) e USEPA (2018). Considerando a classificação da IARC, destacam-se clorotalonil (grupo 2B) e malationa (grupo 2A), contudo, ressalta-se que ambos IAs constam no padrão brasileiro de potabilidade da água para consumo humano e possuem os seguintes VMPs: 45 µg/L e 60 µg/L, respectivamente (BRASIL, 2021). Já pela lista da USEPA (2018), os seguintes compostos são classificados como prováveis carcinogênicos humanos: captana, clorotalonil, espiroclorfenol, isoxaflutol, lactofem, mancozebe, metam sódico, metiram, oxifluorfem, procimidona e tiofanato-metílico. Desses, apenas clorotalonil e mancozebe devem ser monitorados na água de consumo humana pelo padrão de potabilidade brasileiro. Destaca-se que o VMP na água potável estabelecido para o mancozebe + ETU (metabólito do mancozebe) é de 8 µg/L (BRASIL, 2021). Dessa forma, dos 81 IAs excluídos pelos critérios de dinâmica ambiental, 12 IAs apresentam potencial carcinogênico e apesar de possuírem uma menor possibilidade de contaminação dos mananciais não existe um limiar seguro de exposição a compostos carcinogênicos (WHO, 2022; SCHLINKER, 2022). Assim sendo, recomenda-se uma avaliação dos estudos que geraram essas classificações pelas respectivas agências, inclusive reavaliando a autorização de uso no Brasil.

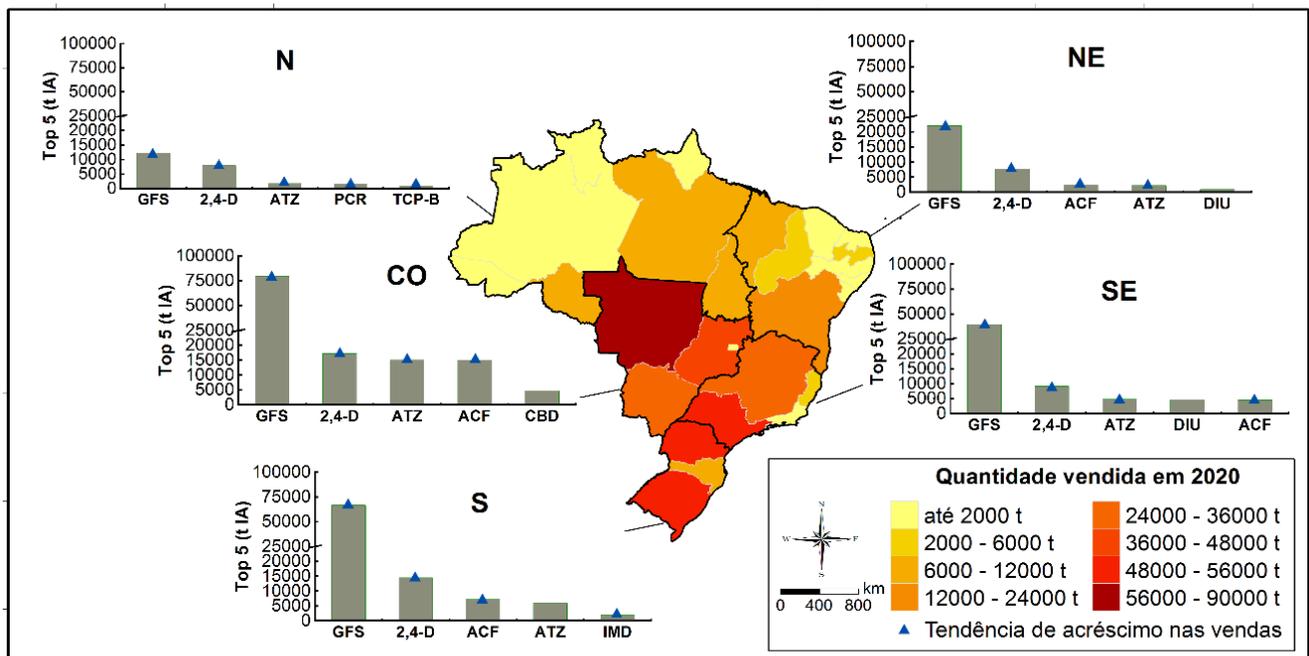
Logo, dos 271 IAs verificados quanto à carcinogenicidade pelas listas da IARC (2022) e USEPA (2018), 32 IAs apresentam potencial carcinogênico reportado por tais agências. Desses, 22 IAs (propinebe, hidróxido de fentina, cresoxim-metílico, iprodiona, tiabendazol, carbaril, tiacloprido, bentiavalicarbe isopropílico, pimetrozina, hexitiazoxi, imazalil, oxadiazona, etridiazol, captana, espiroclorfenol, isoxaflutol, lactofem, metam sódico, metiram, oxifluorfem, procimidona e tiofanato-metílico) não constam na Portaria GM/MS n°888/2021 e, portanto, não possuem um VMP na água de consumo humano. Dessa forma, salienta-se a necessidade de maiores estudos de toxicidade e monitoramento desses IAs, uma vez que não há um limiar seguro de exposição a tais compostos (WHO, 2022; SCHLINKER, 2022). Além disso, destaca-se a necessidade de estudos com intuito de verificar se há a formação de subprodutos tóxicos dos 81 IAs excluídos

pelos critérios de dinâmica ambiental e se esses possuem dinâmica ambiental favorável à contaminação de mananciais de abastecimento.

Comercialização de agrotóxicos no Brasil

Dos 190 IAs que não foram excluídos por nenhum dos critérios de dinâmica ambiental, verificou-se que todos foram comercializados no Brasil no ano de 2020, totalizando 497.860,5 t vendidas no referido ano. As regiões SE (94.398,7t), S (117.634,9t) e CO (172.349,2t) sobressaíram-se com os maiores quantitativos de vendas no país (Figura 1). Nesse contexto, glifosato, 2,4-D e atrazina se mantiveram entre os cinco IAs mais vendidos em todas as regiões do Brasil, sendo o glifosato e o 2,4-D o primeiro e o segundo IA mais vendidos nas macrorregiões, respectivamente, apresentando ainda tendências de acréscimo nas vendas para os próximos anos. Entre os IAs com maior comercialização nas regiões, destaca-se ainda o acefato, que compôs o ranking dos cinco mais vendidos nas regiões S (3º), NE (3º), CO (4º) e SE (5º) com tendências estatisticamente significativas de acréscimo nas vendas em todas essas regiões. Ressalta-se ainda que a comercialização dos cinco IAs mais vendidos em cada região brasileira foi proporcionalmente expressiva em relação à soma das vendas referentes a cada um dos 190 compostos avaliados. Além disso, verificou-se que, em 2020, as vendas dos cinco IAs mais vendidos corresponderam a 84,9% do total na região N, 82,0% na região S, 78,5% na região NE, 76,5% na região CO e 66,2% na região SE.

Figura 1. Comercialização dos ingredientes ativos (IA) de agrotóxicos com maior potencial de contaminação de mananciais nos estados e regiões do Brasil em 2020



Legenda: GFS: glifosato; ATZ: atrazina; PCR: picloram; TCP-B: Triclopir-butotílico; ACF: acefato; CBD: carbendazim; IMD: imidacloprido; DIU: diurom.

Fonte: Autoria própria (2022).

Entre os 190 IAs que apresentam riscos de contaminação de mananciais, verifica-se a presença de 166 compostos que não estão abarcados pela portaria de potabilidade brasileira (Portaria GM/MS nº 888/2021) e, portanto, não possuem limites máximos estabelecidos para a sua ocorrência em águas de consumo humano, apesar de seu potencial de contaminação. Esse fato indica que deve-se avaliar a exposição e a toxicidade de tais compostos, além das concentrações em água para a avaliação dos riscos à população.

Glifosato

O glifosato é um herbicida com uso autorizado em pós-emergência em diferentes culturas agrícolas, dentre as quais cabem citar: algodão, banana, café, cana-de-açúcar, feijão, guaraná, milho, soja e trigo. Também possui

autorização para uso não agrícola para aplicação em margens de rodovias e ferrovias, áreas sob a rede de transmissão elétrica, pátios industriais, oleodutos e aceiros (ANVISA, 2023).

Quanto à dinâmica ambiental, o glifosato possui um valor de Koc na ordem de 1.424 mL/g, indicando uma adsorção ao carbono orgânico do solo de moderada a forte, DT₅₀ no solo de 15 dias, indicando rápida degradação nessa matriz e solubilidade em água a 20°C de 10.500 mg/L superior a 500 mg/L, sendo altamente solúvel em água (IUPAC, 2022; ASSUNÇÃO *et al.*, 2020). Dessa forma, a partir dos valores desses parâmetros chega-se a um GUS baixo e GOSS associado ao solo ou sedimento e dissolvido em água médios, o que indica um baixo potencial de contaminação de águas subterrâneas e médio para águas superficiais (GUSTAFSON, 1989; GOSS, 1992). O log Kow para o glifosato é menor que um, indicando ser um composto hidrofílico (STAUDINGER & ROBERTS, 1996), o que pode ser confirmado por sua elevada solubilidade em água. Ademais, é considerado persistente em água, possuindo um valor de DT₅₀ de 9,9 dias nessa matriz, sendo considerado estável à hidrólise (IUPAC, 2022; ASSUNÇÃO *et al.*, 2020).

Atrazina

A atrazina é um herbicida do grupo químico triazina, com uso agrícola autorizado para aplicação em pré/pós-emergência nos seguintes cultivos: abacaxi, cana-de-açúcar, milho, milheto, pastagem, pinus, seringueira, sisal, soja e sorgo. Na modalidade foliar, pode ser aplicado em gramado. Além disso, possui uso não agrícola autorizado em pós-emergência de plantas daninhas em capinas químicas visando a erradicação de vegetação infestante ao longo de cerca, aceiros, margens de rodovias, oleodutos, leitos de ferrovias e faixa sob rede de alta tensão (ANVISA, 2023).

Destaca-se ainda que a atrazina possui um Koc de 93 mL/g, o que indica baixa adsorção no carbono orgânico do solo, e DT₅₀ no solo de 75 dias, o que lhe confere elevada mobilidade ambiental, favorecendo tanto sua lixiviação quanto seu escoamento superficial. Devido a isso, apresenta altos índices de GUS e GOSS dissolvido em água, indicando alto potencial de contaminação de águas subterrâneas e superficiais, respectivamente (IUPAC, 2022, DIAS *et al.*, 2018; GUSTAFSON, 1989; GOSS, 1992). Além disso, é pouco solúvel em água, com solubilidade de 35 mg/L, e possui um valor de DT₅₀ devido à hidrólise na ordem de 30 dias (IUPAC, 2022; ASSUNÇÃO *et al.*, 2020).

Picloram

O picloram é um herbicida do grupo químico ácido piridinocarboxílico, com aplicação autorizada em cultivos como arroz, cana-de-açúcar, eucalipto, pastagens e trigo. Ademais, possui autorização para usos não agrícolas tais como aplicação em margens de estradas e rodovias, leitos e margens de ferrovias, pátios industriais, faixas de passagem de linhas de transmissão, distribuição elétrica e cabos telefônicos, gasodutos e oleodutos e áreas de conservação da natureza (ANVISA, 2023).

No ambiente, o picloram apresenta um valor de Koc igual a 13 mL/g, o que implica em baixa adsorção ao carbono orgânico do solo e DT₅₀ no solo de 82,8 dias, implicando em moderada degradação nessa matriz (IUPAC, 2022; ASSUNÇÃO *et al.*, 2020). Possui solubilidade na ordem de 560 mg/L, indicando ser altamente solúvel em água (IUPAC, 2022). Além disso, possui persistência em água devido aos valores de DT₅₀ na água e devido à hidrólise nos valores de 80,8 dias e estável, respectivamente (IUPAC, 2022). Apresenta elevados índices de GUS e GOSS dissolvido em água e médio GOSS associado ao solo e sedimento, indicando alta probabilidade de contaminação de mananciais subterrâneos e superficiais (GUSTAFSON, 1989; GOSS, 1992).

Triclopir-butotílico

O triclopir-butotílico é um herbicida do grupo químico ácido piridiniloxialcanóico com uso agrícola autorizado para aplicação em pré/pós-emergência nos cultivos agrícolas de arroz, cana-de-açúcar, eucalipto, milho, pastagem, pinus, soja e trigo. Também possui autorização para uso não agrícola como para aplicação em aceiros, ferrovias, pátios industriais, margens de rodovias, faixas de passagem de linhas de transmissão, distribuição elétrica e cabos telefônicos, gasodutos e áreas de conservação da natureza (ANVISA, 2023).

Esse IA não possui valores de Koc, DT₅₀ na água e devido à hidrólise reportados pela IUPAC (2022), o que inviabilizou a aplicação de alguns dos critérios de dinâmica ambiental, e por isso, foi mantido na lista de compostos prioritários. Todavia, possui DT₅₀ no solo de 1,5 dia e, portanto, apresenta um potencial elevado de

degradação nessa matriz (IUPAC, 2022; ASSUNÇÃO *et al.*, 2020). E valor de solubilidade de 5,75 mg/L, o que indica se tratar de um IA pouco solúvel em água (IUPAC, 2022), aspecto corroborado pelo fato de o log Kow do triclopir-butotílico ser igual a 4,62, ou seja hidrofóbico. Segundo Staudinger e Roberts (1996), substâncias que apresentam log Kow maior que três, apresentam propriedades hidrofóbicas. Assim, com base nos parâmetros mencionados, verifica-se que o triclopir-butotílico tem uma dinâmica ambiental desfavorável à contaminação de mananciais.

Acefato

O acefato é classificado como inseticida e acaricida, pertencente ao grupo químico dos organofosforados. Possui autorização de uso para aplicação foliar em culturas de algodão, amendoim, batata, cebola, cenoura, citros, feijão, melão, milho, soja e tomate, sendo esse último autorizado somente para tomate rasteiro, com fins industriais (ANVISA, 2023).

Ademais, o acefato apresenta valor de Koc na ordem de 302 mL/g (IUPAC, 2022). Como tal valor é inferior a 1.000 mL/g, trata-se de um composto que se adsorve moderadamente ao carbono orgânico do solo (ASSUNÇÃO *et al.*, 2020). Ainda nessa matriz, apresenta um DT₅₀ de três dias, o que indica rápida degradação no solo (IUPAC, 2022). Em condições aeróbias e a depender do tipo de solo, degrada-se rapidamente à metamidofós (MINISTRY OF HEALTH, 2019). Destaca-se que o metamidofós é um princípio ativo de agrotóxico que se encontra proibido para uso e comercialização no Brasil desde o ano de 2012 (ASSUNÇÃO *et al.*, 2021). O acefato apresenta elevada solubilidade, no valor de 790.000 mg/L, DT₅₀ na água de 169 dias e DT₅₀ devido à hidrólise de 50 dias (IUPAC, 2022). Além disso, apresenta GUS baixo, GOSS associado ao solo ou sedimento baixo e GOSS devido sua dissolução em água médio, aspectos que indicam se tratar de um composto com baixa probabilidade de contaminação de águas subterrâneas e média para águas superficiais (GUSTAFSON, 1989; GOSS, 1992; MINISTRY OF HEALTH, 2019).

Carbendazim

O carbendazim é um fungicida do grupo químico benzimidazol com uso autorizado nos cultivos de algodão, arroz, cana-de-açúcar, cevada, citros, feijão, maçã, milho, soja e trigo. Além disso, pode ser utilizado como preservante de madeira, com uso exclusivo para tratamento de madeiras destinadas para dormentes, postes, cruzetas, mourões para cercas rurais, esteios e vigas, com a finalidade de registro no IBAMA (ANVISA, 2023).

O carbendazim é moderadamente adsorvido ao solo, com um Koc na ordem de 223 mL/g e um DT₅₀ de 40 dias (IUPAC, 2022). Trata-se de um IA pouco solúvel em água, com solubilidade de 8 mg/L (IUPAC, 2022). Em decorrência dos valores citados, possui GUS médio, GOSS associado ao solo ou sedimento baixo e GOSS dissolvido em água alto, o que implica em médio potencial de contaminação de águas subterrâneas e alto para águas superficiais devido à sua dissolução (GUSTAFSON, 1989; GOSS, 1992).

Imidacloprido

O imidacloprido é um inseticida do grupo químico neonicotinoide que possui autorização de aplicação em diversas culturas agrícolas, dentre as quais cabe destacar: abacaxi, algodão, amendoim, arroz, café, cana-de-açúcar, feijão, milho, soja, tomate e trigo. Pode ser aplicado no controle de cupins, conforme aprovação em rótulo e bula dos produtos comercializados. Além disso, apresenta emprego domissanitário, como, por exemplo, aplicação por entidades e campanhas de saúde pública e na jardinagem amadora (ANVISA, 2023).

Esse inseticida possui um valor de Koc de 249 mL/g, indicando se tratar de um IA moderadamente móvel no solo (IUPAC, 2022; ASSUNÇÃO *et al.*, 2020). Possui solubilidade na ordem de 610 mg/L, o que implica em alta solubilidade em água (IUPAC, 2022). Além disso, é persistente no solo e em água, com valores de DT₅₀ no solo e em água de 191 dias e 30 dias, respectivamente (IUPAC, 2022). Possui índice de GUS alto, bem como alto GOSS devido sua dissolução em água, o que implica em elevada probabilidade de contaminação de mananciais de abastecimento subterrâneos e superficiais, respectivamente (GUSTAFSON, 1989; GOSS, 1992).

Diurrom

O diurrom é um herbicida do grupo químico ureia, com autorização de uso no Brasil para aplicação em pré/pós-emergência de cultivos de abacaxi, alfafa, algodão, banana, cacau, café, cana-de-açúcar, citros,

eucalipto, mandioca, milho, seringueira, soja, trigo e uva. Além disso, apresenta autorização de uso não agrícola para aplicação em ferrovias, rodovias, pistas de aeroportos, oleodutos, subestações elétricas, pátios industriais, bem como para aplicação na manutenção de aceiros de florestas e de reflorestamentos (ANVISA, 2023).

Salienta-se ainda que o diurom apresenta um Koc de 499 mL/g, indicando ser um composto com mobilidade moderada no solo (IUPAC, 2022). Possui persistência em matrizes ambientais, com DT₅₀ de 146,6 dias no solo, 8,8 dias na água e 1.290 dias devido à hidrólise. Apresenta uma solubilidade na ordem de 35,6 mg/L, o que indica se tratar de um IA pouco solúvel em água (IUPAC, 2022). Portanto, apresenta índice de GUS alto, GOSS associado ao solo e sedimento médio e alto GOSS dissolvido em água, culminando em elevado potencial de contaminação de águas subterrâneas e superficiais (GUSTAFSON, 1989; GOSS, 1992).

CONCLUSÕES

Dos 322 compostos com comercializações reportadas no período de 2009 a 2020 para o Brasil, foram identificados 271 IAs de agrotóxicos, os quais foram avaliados por critérios estabelecidos, pautados em parâmetros relativos à dinâmica ambiental. Desses 271, 81 foram excluídos pelos critérios e apresentam baixo risco de contaminação de mananciais. No entanto, 190 IAs não foram excluídos por nenhum dos critérios e, dessa forma, apresentam potencial de contaminação de mananciais de abastecimento.

Dos 271 IAs que foram submetidos aos critérios de dinâmica ambiental, entre excluídos e remanescentes, 32 IAs possuem potencial carcinogênico reportado pelas listas de classificação quanto à carcinogenicidade da IARC e da USEPA, sendo que 22 IAs não possuem VMP estabelecido pelo atual padrão brasileiro de potabilidade da água para consumo humano, se fazendo necessários mais estudos acerca da toxicidade e de monitoramento desses IAs no ambiente, uma vez que não há um limiar seguro de exposição humana a tais compostos. Adicionalmente, recomenda-se uma reavaliação da autorização do uso de tais compostos no Brasil.

Dos oito compostos identificados entre os cinco mais vendidos nas macrorregiões brasileiras, seis possuem valores máximos permitidos estabelecidos na portaria de potabilidade da água brasileira (Portaria GM/MS nº 888/2021) e dois constaram entre os mais vendidos em apenas uma região (triclopir butotílico na região Norte e imidacloprido na região Sul). Observou-se ainda que a maioria dos IAs mais vendidos apresentaram tendências de acréscimo nas vendas nos próximos anos em grande parte das macrorregiões brasileiras.

Nesse contexto, recomenda-se a continuação de estudos e monitoramento para avaliação dos riscos a população, em especial daqueles que não constam na referida portaria, considerando ainda os padrões de uso de cada região. Recomenda-se também verificar o potencial de formação de subprodutos tóxicos oriundos dos IAs listados e se esses possuem dinâmica ambiental favorável à contaminação de mananciais superficiais e subterrâneos.

AGRADECIMENTOS

À Pró-Reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa da Universidade Federal de Juiz de Fora pelas bolsas de Iniciação Científica concedidas. Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PEC) da UFJF e à FAPEMIG pelo auxílio na participação no evento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANVISA. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. **Monografias de agrotóxicos**. 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/anvisa/pt-br/setorregulado/regularizacao/agrotoxicos/monografias>>. Acesso em: mar. 2023.
2. ASSUNÇÃO, T. O. G.; GOMES, F. B. R.; BRANDT, E. M. F.; PEREIRA, R. O. Novos agrotóxicos e o padrão de potabilidade da água: dinâmica ambiental e riscos à saúde. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 17, p. 1-15, 2020.

3. ASSUNÇÃO, T. O. G.; THONI, L. S.; GOMES, F. B. R.; BOTTREL, S. E. C.; PEREIRA, R. O. Comercialização de Agrotóxicos no Brasil. In: 31º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2021, Evento Híbrido. **Anais...** Curitiba: ABES, 2021.
4. BRASIL. **Portaria GM/MS Nº 888/2021, de 4 de maio de 2021.** *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Poder Executivo, Brasília, DF, 7 mai. 2021.
5. DIAS, A. C. L.; SANTOS, J. M. B.; SANTOS, A. S. P.; BOTTREL, S. E. C.; PEREIRA, R. O. Ocorrência de Atrazina em águas no Brasil e remoção no tratamento da água: revisão sistemática. **Revista Internacional de Ciências**, v. 08, n. 02, p. 234-253, 2018.
6. GOSS, D.W. Screening Procedure for Soils and Pesticides for Potential Water Quality Impacts. *Weed Technology*, v.6, p.701-708, 1992.
7. GUSTAFSON, D.I. Groundwater Ubiquity Score: A Simple Method for Assessing Pesticide Leachability. *Environmental Toxicology and Chemistry*, v.8, p.339-357, 1989.
8. IARC. International Agency for Research on Cancer. **Agents classified by the IARC monographs (Vol. 1- 125).** Disponível em: <<https://monographs.iarc.fr/agents-classified-by-the-iarc/>>. Acesso em: ago. 2022.
9. IBAMA. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Relatórios de Comercialização.** 2022. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/agrotoxicos/relatorios-de-comercializacao-de-agrotoxicos#sobreosrelatorios>>. Acesso em: ago. 2022.
10. IUPAC. International Union of Pure and Applied Chemistry). **Pesticides Properties DataBase.** 2022. Disponível em: <<https://sitem.herts.ac.uk/aeru/iupac/>>. Acesso em: ago. 2022.
11. LOPES, C. V. A.; ALBUQUERQUE, G. S. C. Agrotóxicos e seus impactos na saúde humana e ambiental: uma revisão sistemática. **Saúde em Debate**, v. 42, n. 117, p. 518-534, 2018.
12. MAHMOOD, I.; IMADI, S. R.; SHAZADI, K.; GUL, A.; HAKEEM, K. R. Effects of Pesticides on Environment. In: HAKEEM, K., AKHTAR, M., ABDULLAH, S. (org.). **Plant, Soil and Microbes.** Springer, Cham, 2016. p. 253-269.
13. MINISTRY OF HEALTH. New Zealand. **Guidelines for drinking-water quality management for New Zealand: Volume 3 - Datasheets: chemical and physical determinands, Part 2.3: Pesticides.** 2019.
14. MORAES, R. F. **Agrotóxicos no Brasil: Padrões de uso, política da regulação e prevenção da captura regulatória.** Brasília: Rio de Janeiro: Ipea, 2019.
15. MOTTA, M. B.; LEITE, L. C. O. F.; PEREIRA, R. O. Método de avaliação do potencial de contaminação dos mananciais de abastecimento por agrotóxicos no município de Juiz de Fora (Minas Gerais). **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v. 10, n. 2, p. 41-57, 2022.
16. RANI, L. et al. An extensive review on the consequences of chemical pesticides on human health and environment. **Journal of Cleaner Production**, v. 283, 2021.
17. SCHLINKER, C. S. **Norma brasileira de potabilidade: análise das quantidades de agrotóxicos permitidas na água sob a perspectiva da saúde de crianças e adolescentes.** 133 f. 2022. Dissertação (Mestrado em Ciências, área de concentração: toxicologia ambiental). Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca, Fundação Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro, 2022.
18. SILVA, F. H. K. P.; ANTUNES, L. F. S.; VAZ, A. F. S.; SILVA, M. S. R. A. Agrotóxicos no Brasil: uma compreensão do cenário atual de utilização e das propriedades do solo que atuam na dinâmica e retenção destas moléculas. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 9, 2022.
19. STAUDINGER, J.; ROBERTS, P. V. A critical review of Henry's law constants for environmental applications. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 26, n. 3, p. 205-297, 1996.
20. USEPA. United States Environmental Protection Agency. **Chemicals evaluated for carcinogenic. Potential annual cancer report.** 2018. Disponível em: <http://npic.orst.edu/chemicals_evaluated.pdf>. Acesso em: ago. 2022.
21. VALARINI, P. J.; NARDO, E. A. B.; GOMES, M. A. F.; FERREIRA, C. J. A.; CASTRO, V. L. S. S. Dinâmica e efeitos de agrotóxicos no meio ambiente. In: F. C. O. FREIRE, J. E. CARDOSO & F. M. P. VIANA (org.). **Doenças de fruteiras tropicais de interesse agroindustrial.** Brasília: Embrapa-SPI, 1998. P. 625-686.
22. WHO. World Health Organization. **Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first and second addenda. 4th ed + 1st add + 2nd add.** Geneva: World Health Organization, 2022. Disponível em: <<https://apps.who.int/iris/handle/10665/352532>>. Acesso em: dez. 2022.