

REVISÃO SOBRE FATORES FÍSICOS E QUÍMICOS DOS HERBICIDAS NO SOLO, DESTACANDO O CONCEITO DE LIXIVIAÇÃO E SEU POTENCIAL

Data de submissão: 16/11/2023

Data de aceite: 22/12/2023

Bruna Ferreira Lima

Universidade do Estado de Mato Grosso
– UNEMAT
Tangará da Serra – MT
<http://lattes.cnpq.br/7883473403107104>

Carlos Henrique Costa Reverte

Universidade do Estado de Mato Grosso
– UNEMAT
Tangará da Serra – MT
<http://lattes.cnpq.br/3710061389597391>

Carlos Augusto de Moraes Coimbra

Universidade do Estado de Mato Grosso
– UNEMAT
Tangará da Serra – MT
<http://lattes.cnpq.br/9513398378277578>

Júlia Magro Machado

Universidade do Estado de Mato Grosso
– UNEMAT
Tangará da Serra – MT
<http://lattes.cnpq.br/0607324347848895>

Ana Carolina Dias Guimarães

Universidade do Estado de Mato Grosso
– UNEMAT
Alta Floresta – MT
<http://lattes.cnpq.br/5753126877699144>

Kassio Ferreira Mendes

Universidade Federal de Viçosa
Viçosa - MG
<http://lattes.cnpq.br/7101423608732888>

Gabriel Casagrande de Castro

Universidade do Estado de Mato Grosso
– UNEMAT
Tangará da Serra – MT
<http://lattes.cnpq.br/1484881592326663>

Miriam Hiroko Inoue

Universidade do Estado de Mato Grosso
– UNEMAT
Tangará da Serra – MT
<http://lattes.cnpq.br/5603582678388704>

RESUMO: Os herbicidas são amplamente utilizados na agricultura em larga escala, desempenhando um papel crucial na produção de alimentos. No entanto, eles podem ter efeitos negativos em diversos organismos, especialmente quando entram em corpos d'água. Monitorar a presença e os efeitos dos herbicidas em mananciais é essencial para uma agricultura sustentável, especialmente no Brasil, um dos maiores consumidores e produtores de alimentos no mundo, que possui uma quantidade significativa de recursos hídricos. Quando

um herbicida é aplicado no solo em pré-emergência, ele está sujeito a processos de sorção, lixiviação e degradação, influenciados por fatores físicos, químicos e biológicos. Neste contexto, este texto propõe uma revisão que aborda fatores físicos e químicos dos herbicidas e o conceito da lixiviação e seu potencial. Além disso, são apresentados exemplos de herbicidas recentemente detectados em corpos d'água no Brasil e técnicas para sua detecção e quantificação na água.

PALAVRAS-CHAVE: Defensivos agrícola, fluido percolante, contaminação.

REVIEW OF PHYSICAL AND CHEMICAL FACTORS OF HERBICIDES IN THE SOIL, HIGHLIGHTING THE CONCEPT OF LEACHING AND ITS POTENTIAL

ABSTRACT: Herbicides are widely used in large-scale agriculture, playing a crucial role in food production. However, they can have negative effects on various organisms, especially when they enter bodies of water. Monitoring the presence and effects of herbicides in water sources is essential for sustainable agriculture, especially in Brazil, one of the largest consumers and producers of food in the world, which has a significant amount of water resources. When a herbicide is applied to soil pre-emergence, it is subject to sorption, leaching and degradation processes, influenced by physical, chemical and biological factors. In this context, this text proposes a review that addresses physical and chemical factors of herbicides and the concept of leaching and its potential. Furthermore, examples of herbicides recently detected in water bodies in Brazil and techniques for their detection and quantification in water are presented.

KEYWORDS: Agricultural pesticides, percolating fluid, contamination.

INTRODUÇÃO

O crescimento populacional tem impulsionado um aumento na produção de alimentos recentemente. Para alcançar esse objetivo, várias tecnologias foram adotadas, incluindo a abertura de novas áreas agrícolas, intensificação do uso do solo, uso de fertilizantes, variedades melhoradas, plantios adensados, agroquímicos e, mais recentemente, plantas transgênicas. Notavelmente, a utilização de herbicidas desempenhou um papel significativo na expansão e desenvolvimento da agricultura brasileira (MANCUSO et al., 2011).

No cultivo em larga escala, a utilização intensiva de insumos é comum, sendo os defensivos agrícolas essenciais para alcançar altos níveis de produtividade. No entanto, o uso excessivo e inadequado desses produtos químicos sintéticos pode ter graves impactos ambientais (BARIZON et al., 2006).

Os herbicidas são frequentemente identificados em estudos de qualidade de águas superficiais e subterrâneas devido ao uso intensivo desses produtos (CARTER, 2000; TANABE et al., 2001). Nas regiões próximas aos campos de cultivo de cana-de-açúcar, é observada uma maior presença de resíduos de herbicidas devido ao fato de que essa cultura é uma das que mais utiliza esses produtos para controlar plantas infestantes ou daninhas (SOUTHWICK et al., 2002; VIVIAN et al., 2007).

O solo é o ponto de destino para os produtos químicos utilizados na agricultura,

quer sejam aplicados diretamente ao solo ou nas plantas. Quando entram em contato com o solo, os herbicidas passam por processos físico-químicos que determinam seu destino no ambiente. Devido à importância de usar insumos agrícolas de forma responsável para reduzir os impactos ambientais da agricultura, vários estudos têm sido conduzidos para entender como os herbicidas interagem com o solo.

Quando um herbicida é aplicado no solo em pré-emergência, ele está sujeito a processos de sorção, lixiviação e degradação, influenciados por fatores físicos, químicos e biológicos. Além disso, o herbicida pode ser absorvido tanto pelas plantas daninhas quanto pelas plantas cultivadas (VELINI, 1992).

O conhecimento do comportamento dos herbicidas é importante para avaliação dos riscos de contaminação, sendo a degradação um processo valioso para atenuar os níveis de resíduos contaminantes no solo. Esse processo consiste na quebra das moléculas de agrotóxicos em partículas menores, visando torná-las menos tóxicas (BRUM, FRANCO, JUNIOR, 2013).

O presente estudo teve como objetivo relacionar os conceitos de degradação, sorção e lixiviação, debatendo sobre a capacidade de lixiviação dos herbicidas, seu comportamento sobre o solo, e a interferência dos fatores físicos e químicos nesse processo.

REVISÃO DA LITERATURA

O que são herbicidas

As plantas daninhas representam um desafio significativo na agricultura global, causando perdas anuais que totalizam cerca de 95 bilhões de dólares devido a várias formas de interferência nas culturas e efeitos indiretos na produção de alimentos. Como resultado, especialistas da área agrícola continuam dedicando esforços para estudar e avaliar métodos diversos de manejo dessas plantas (FAO, 2009).

Existem várias abordagens para o controle de plantas daninhas na agricultura, incluindo medidas preventivas para evitar a entrada de espécies no sistema, técnicas culturais, métodos de controle físico ou mecânico e a utilização de inimigos naturais. No entanto, o método de controle mais comum e amplamente utilizado é a aplicação de herbicidas. Esses produtos fitossanitários, fabricados sinteticamente, têm a função de inibir o crescimento e/ou causar a morte das plantas daninhas quando usados em concentrações adequadas (SANTOS et al., 2013).

Os herbicidas são frequentemente detectados em estudos de qualidade de águas superficiais e subterrâneas devido ao seu uso intensivo. Nas áreas próximas ao cultivo de cana-de-açúcar, a presença de resíduos desses compostos é mais comum, uma vez que essa cultura é uma das que mais utiliza herbicidas para o controle de plantas infestantes e vegetais (MONQUERO et al., 2010).

O comportamento dos herbicidas em solos varia de acordo com o tipo de solo, as condições climáticas e as propriedades dos produtos utilizados. É crucial compreender esses fatores para prever como os herbicidas se comportarão em diferentes categorias de solo, escolher as doses adequadas e prevenir impactos adversos no meio ambiente e em cultivos futuros (Rossi et al., 2005).

O movimento descendente dos herbicidas no solo é afetado por diversos fatores, incluindo o teor e tipo de matéria orgânica, a composição, tamanho e distribuição das partículas do solo, o pH e densidade do solo, o tamanho e distribuição dos poros, a solubilidade em água das moléculas dos herbicidas e a taxa de precipitação pluvial. Esses elementos desempenham um papel fundamental na determinação da mobilidade e eficácia dos herbicidas no ambiente (MONQUERO et al., 2010).

São agentes biológicos ou substâncias químicas capazes de matar ou suprimir o crescimento de espécies específicas, incluindo fungos e outros microrganismos. No Brasil, estão em andamento diversas pesquisas sobre o uso de fungos patogênicos como agentes herbicidas, com resultados promissores. As substâncias químicas podem ser orgânicas, representando a maioria dos herbicidas atualmente usados, ou inorgânicos, que foram empregados no controle de plantas específico no passado, como o NaCl e o H₂SO₄. (ROMAN et al., 2005).

Os herbicidas são classificados com base em grupos químicos e seus mecanismos de ação, o mecanismo de ação é especialmente importante para evitar a resistência de plantas a herbicidas. Herbicidas com o mesmo mecanismo de ação tendem a causar sintomas semelhantes nas plantas, são aplicados da mesma forma e têm limitações e toxicologia semelhantes. No entanto, alguns grupos de herbicidas, como as sulfoniluréias, podem variar amplamente em termos de comportamento ambiental e no controle de diferentes espécies de plantas. (ROMAN et al., 2005).

A substituição de outros métodos de controle pelo uso de herbicidas resultou em uma redução significativa de 97% no tempo gasto no manejo de plantas daninhas. Esse fato desempenhou um papel crucial no crescimento da agricultura e na disponibilidade de mão-de-obra para o desenvolvimento industrial em várias nações nas décadas anteriores, além de ter contribuído para um aumento expressivo na produção de alimentos (GIANESSI, 2013).

No Brasil, o maior consumidor de produtos fitossanitários atualmente, existem 540 herbicidas registrados, compostos por 142 ingredientes ativos. Globalmente, a classe dos herbicidas é a mais amplamente utilizada entre os produtos fitossanitários (BRASIL, 2023).

Desempenham um papel fundamental no desenvolvimento e na estabilidade do agronegócio, tendo um impacto direto na economia de muitos países (CAI, 2008; GIANESSI, 2013). No Brasil, devido à extensão das áreas destinadas à produção de alimentos, é aplicado anualmente um total de aproximadamente 470 mil toneladas de herbicidas, dos quais 214 mil toneladas correspondem a ingredientes ativos (SINDAG, 2023).

A aplicação média de herbicidas no Brasil é de 6,9 kg por hectare por ano, levando em conta a área dedicada à agricultura (IBGE, 2023). Embora os herbicidas sejam projetados para controlar plantas, eles podem afetar organismos de outros reinos, tanto diretamente como indiretamente, devido à toxicidade dos ingredientes ativos e/ou das substâncias na formulação comercial. A intoxicação de animais pode resultar em danos a várias enzimas, má formação de tecidos, prejuízos reprodutivos e alterações no comportamento (TSAI, 2013).

Após serem aplicados, a maioria dos herbicidas se move de sua área de ação inicial. Nesse processo, eles podem ser adsorvidos, absorvidos, sofrer degradação física, química ou biológica, ou formar complexos com elementos do sistema (FLURY, 1996).

A previsão das perdas de produtos fitossanitários no ambiente é um desafio devido à ampla variedade de fatores ambientais, práticas operacionais e tipos de produtos, bem como à complexidade das interações entre eles. Embora as moléculas de herbicidas possam ser encontradas em várias matrizes ambientais, os corpos de água são os principais locais de acumulação final dessas substâncias, especialmente em agrossistemas com uma extensa rede hidrográfica e uso intensivo de herbicidas (LEU et al., 2004; MURRAY et al., 2010).

PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DOS HERBICIDAS

O comportamento de um herbicida está intimamente ligado às suas características físico-químicas e às condições ambientais durante a aplicação. Ao selecionar um herbicida, é essencial considerar suas propriedades físico-químicas, independentes da forma de aplicação. As características mais significativas a serem observadas antes da aplicação incluem solubilidade em água (S_w), pressão de vapor (C_a), coeficiente de repartição carbono-água (K_{oc}) e meia-vida no solo (KARAM et al., 1995).

Solubilidade em água (S_w)

A solubilidade em água de um herbicida determina sua capacidade de se misturar com a água, formando uma solução. Essa solubilidade é geralmente expressa em partes por milhão (ppm) e varia entre diferentes herbicidas. Valores mais altos de solubilidade indicam uma maior capacidade de dissolução em água, resultando em maior disponibilidade na solução do solo. Isso afeta diretamente processos físico-químicos como absorção pelas raízes, adsorção nas partículas do solo, biodegradação, lixiviação e volatilização.

Pressão de vapor (C_a)

A propensão de uma substância química para mudar a fase líquida para a fase gasosa e migrar para a atmosfera é avaliada pela pressão de vapor. No caso dos herbicidas, a volatilização pode ocorrer diretamente da solução ou na superfície das plantas. A pressão

de vapor varia com a temperatura e é expressa em milímetros (mm) de mercúrio (Hg) a 25 °C. Quanto menor a pressão de vapor, maior é a propensão do herbicida à volatilização.

Herbicidas altamente voláteis são extraordinários de incorporação no solo por meio de implementos agrícolas ou água de controle para prevenir a perda na forma gasosa. Quando aplicados em solo seco, especialmente em condições de alta temperatura e baixa umidade do ar, herbicidas voláteis podem volatilizar rapidamente a superfície do solo, sendo importante destacar que a umidade aumenta significativamente com chuva ou supervisão na lavoura.

Coefficiente de repartição carbono orgânico-água (Koc)

O coeficiente de repartição de carbono orgânico-água (Koc) é calculado como a relação entre o coeficiente de adsorção do herbicida ao solo (Kd) e a quantidade de carbono orgânico no solo. O coeficiente de adsorção (Kd) é determinado pela relação entre o herbicida adsorvido nas partículas do solo (mg kg⁻¹) e o herbicida dissolvido na solução do solo ($\mu\text{rn/L}$). Esse coeficiente indica a propensão do herbicida a se ligar à matéria orgânica do solo, embora a adsorção às partículas de argila também seja crucial.

O coeficiente de adsorção (Kd) é definido como a razão entre a quantidade de herbicida adsorvido e a quantidade de herbicida na solução do solo. O coeficiente de repartição de carbono orgânico-água (Koc) é desenvolvido para estimar a adsorção de herbicidas ao solo, classificando-a como muito forte, forte, média ou leve. Herbicidas adsorvidos aos colóides do solo apresentam maior risco de contaminação de águas superficiais devido ao escoamento do solo causado por excesso de água de chuva ou privacidade.

Meia vida (T ½)

A meia-vida de um herbicida é o período em que metade do composto é degradado, diminuindo sua persistência no solo. No entanto, a eficiência no controle de plantas aparentes não é determinada apenas pela meia-vida, pois o herbicida pode permanecer no solo abaixo da zona de absorção radicular sem eficácia no controle. Do ponto de vista agrônomo, a persistência influencia a presença residual dos herbicidas no solo.

Umidade do solo e temperatura

O conhecimento do volume de chuva após a aplicação do herbicida, juntamente com a temperatura e umidade do solo, é crucial para avaliar a possibilidade de resíduo no solo. Condições de baixa umidade geralmente diminuem a taxa de manipulação do herbicida, enquanto a umidade só facilita a dissipação do produto. Herbicidas da família das dinitroanilinas degradam-se mais rapidamente sobre solo saturado, mas em períodos secos, a movimentação do herbicida é reduzida, aumentando sua adsorção nas partículas

de argila e matéria orgânica. Por exemplo, o imazaquin, um herbicida residual para a cultura da soja, requer um mínimo de umidade no solo para sua disponibilidade, proporcionando assim a possibilidade de eliminação para o plantio de culturas subsequentes. A temperatura do solo também é vital para a manipulação do herbicida, sendo que as temperaturas baixas diminuem a taxa de eliminação, resultando em meias maiores-vidas em solos de climas temperados em comparação com solos de climas tropicais.

pH do solo

O pH do solo desempenha um papel crucial na persistência e manipulação de vários herbicidas. A persistência de certos herbicidas, como as triazinas, é mais pronunciada em condições de pH do solo acima de 7,0. No entanto, as sulfoniluréias têm uma taxa de transferência reduzida quando o pH do solo ultrapassa 6,8. A persistência pode ser aumentada em solos com pH abaixo de 5,9, exemplificado pelo herbicida clomazone (KARAM et al., 1995).

HERBICIDAS DETECTADOS NO BRASIL

A agricultura brasileira é uma das mais importantes em termos de produção de alimentos, destacando-se como o maior produtor de cana-de-açúcar, café, laranja, frutas tropicais e biodiesel. Além disso, o país se sobressai em outras culturas como soja, milho, arroz, algodão e tem um agronegócio em crescimento constante. No entanto, devido ao uso intensivo de herbicidas e preocupações com os resíduos desses produtos no meio ambiente, há uma atenção crescente para a detecção dessas moléculas em mananciais (SANTOS et al. 2013).

Em estudos anteriores, foi observado que o herbicida 2,4-D não era um contaminante do aquífero guarani em níveis preocupantes. No entanto, o tebuthiuron, um herbicida com alto poder residual, foi detectado em amostras de água a uma profundidade de 53 metros na mesma região. Esses resultados levam à classificação do tebuthiuron como uma ameaça potencial às águas subterrâneas e superficiais (CERDEIRA et al. 2002).

Em pesquisas mais recentes, o diuron e o ametryn foram identificados como os herbicidas mais vulneráveis à contaminação da água superficial, com concentrações bloqueadas em rios do Estado de Sergipe. A intensidade da chuva desempenha um papel importante na entrada desses produtos na água (BRITTO et al. 2012).

Portanto, a detecção e a avaliação dos herbicidas em mananciais são questões cruciais dadas a importância da agricultura no Brasil e a necessidade de proteger o meio ambiente e as fontes de água.

O herbicida clomazone é autorizado para uso no Brasil em diversas culturas, incluindo soja, cana-de-açúcar, algodão, milho, arroz, batata, fumo, mandioca e pimentão.

Possui notável persistência no solo, superior a 150 dias, é moderadamente volátil, altamente solúvel em água e tem um coeficiente de sorção (Koc) de 300 mL g⁻¹, conforme informações de RODRIGUES & ALMEIDA (2011). O herbicida clomazone é autorizado para uso no Brasil em diversas culturas, incluindo soja, cana-de-açúcar, algodão, milho, arroz, batata, fumo, mandioca e pimentão. Possui notável persistência no solo, superior a 150 dias, é moderadamente volátil, altamente solúvel em água e tem um coeficiente de sorção (Koc) de 300 mL g⁻¹, conforme informações de RODRIGUES & ALMEIDA (2011).

O herbicida clomazone é autorizado para uso no Brasil em diversas culturas, incluindo soja, cana-de-açúcar, algodão, milho, arroz, batata, fumo, mandioca e pimentão. Possui notável persistência no solo, superior a 150 dias, é moderadamente volátil, altamente solúvel em água e tem um coeficiente de sorção (Koc) de 300 mL g⁻¹ (RODRIGUES & ALMEIDA (2011).

MARCHEZAN et al. (2007) e SILVA et al. (2009) classificou o herbicida clomazone como um dos principais contaminantes de mananciais no Brasil, especialmente em áreas de cultivo de arroz. Eles observaram que em 50% das amostras de água coletadas, a concentração de clomazone atingiu um máximo de 7,72 µg L⁻¹, além disso, esses estudos também detectaram a presença de outros herbicidas usados na cultura do arroz, como quinclorac e propanil, em concentrações máximas de 6,6 e 12,9 µg L⁻¹, respectivamente.

Em um estudo conduzido no Estado do Mato Grosso, DORES et al. (2006) coletaram água superficial e subterrânea e relataram a presença de vários herbicidas, incluindo atrazina, metolacoloro, metribuzin, simazina e trifluralina, em concentrações máximas de 0,156; 1.732; 0,351; 0,085 e 0,102 µg L⁻¹, respectivamente. Além disso, ARMAS et al. (2007) detectaram a presença de herbicidas como acetocloro, ametrina, atrazina, clomazone, diuron, glifosato, hexazinona, isoxaflutol, pendimetalina, simazina, sulfentrazone, tebutiuron e trifluralin em águas superficiais e sedimentos do Rio Corumbataí, uma região produtora de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, os autores destacaram que as triazinas, devido à sua persistência no solo e solubilidade em água, foram os principais contaminantes identificados.

No que diz respeito às triazinas, o herbicida atrazina é amplamente relatado como um dos principais contaminantes de água em todo o mundo. No Brasil, em estudos realizados por ARMAS et al. (2007), as concentrações de atrazina em água superficial variaram entre 0,6 e 2,7 µg L⁻¹, especialmente em áreas onde a cana-de-açúcar é predominante. Isso ressalta a presença significativa desse herbicida na água, com impacto notável na região científica. Apesar de possuir registro, o herbicida atrazina não é frequentemente utilizado na cultura de cana-de-açúcar. Isso destaca a notável persistência desse produto no solo e sua entrada mais lenta na água.

A atrazina é classificada como altamente suscetível à lixiviação, de acordo com os critérios da USEPA, GUS e GOSS, com uma média de resíduos encontrados em corpos de água de 20 µg L⁻¹ em áreas agrícolas (NLANI, 2010). Apesar de sua baixa pressão de

vapor ($3,9 \times 10^{-5}$ mPa), algumas condições do solo e do clima, juntamente com sua baixa adsorção ao solo, contribuem para a frequente detecção desse herbicida, inclusive em águas pluviais (MOREIRA et al., 2012).

A matriz principal do herbicida atrazina é a água subterrânea, conforme ROHR & MCCOY (2010). No entanto, a ampla utilização desse herbicida pode ser considerada como a principal causa da sua presença em mananciais. Isso resultou na proibição de suas transações em alguns países, mesmo após 20 anos da isenção da exclusão, conforme indicado por HILLEBRAND et al. (2013). Isso evidencia a persistência e impacto significativo da atrazina no meio ambiente.

MOREIRA e COLS. (2012) realizaram uma coleta de água superficial, subterrânea e de precipitações no período de setembro de 2007 a outubro de 2009 no Estado do Paraná e avaliaram a presença de 16 produtos fitossanitários. O herbicida atrazina se destacou como o mais significativo, com concentrações de 75,43 $\mu\text{g L}^{-1}$, 9,33 $\mu\text{g L}^{-1}$ e 18,96 $\mu\text{g L}^{-1}$ em água de chuva, rio e água subterrânea, respectivamente. Isso realça a ocorrência expressiva de atrazina nas águas da região e sua detecção em diferentes fontes de água.

DESLOCAMENTO DE HERBICIDAS PARA CORPOS D'ÁGUA.

A contaminação de mananciais por herbicidas não está apenas relacionada à proximidade entre a área tratada e os corpos de água, mas também a diversos outros fatores. Estes incluem as características técnicas de aplicação, propriedades físicas e químicas dos produtos, condições do solo, clima, topografia e práticas de manejo da área. Em muitos casos, vários desses fatores negativos se combinam, aumentando a probabilidade de entrada e permanência dos herbicidas na água.

A aplicação de herbicidas geralmente envolve o uso de água como veículo, ou seja, é uma aplicação líquida. No entanto, a contaminação de mananciais por herbicidas pode ocorrer mesmo antes da aplicação, devido ao armazenamento inadequado ou manuseio incorreto dos produtos ou embalagens. Em muitos casos, quando essas atividades são realizadas próximas a corpos de água, isso pode resultar na entrada de herbicidas no ambiente aquático (TAVELLA et al., 2011).

No Brasil, embora o uso de produtos fitossanitários seja crucial, práticas de desobediência à legislação e negligência nos procedimentos de aplicação, especialmente em áreas próximas a mananciais, são frequentemente observadas.

Nesse sentido, FILIZOLA et al. (2005), um estudo realizado na região leste do Estado de São Paulo visava avaliar a contaminação de um córrego por defensivos agrícolas. Os resultados mostraram que a presença desses produtos na água estava relacionada à lavagem de equipamentos e embalagens próxima ao reservatório de água, em vez do uso dos produtos nas lavouras.

Em relação ao risco de contaminação de mananciais, a aplicação de herbicidas em

campo pode ser considerada insignificante quando comparada à lavagem de embalagens e equipamentos diretamente em poços de água. Como exemplo, considerando a aplicação de atrazine na dosagem de 2,0 kg por hectare, mesmo em um cenário ecotoxicológico adverso em que o produto é aplicado diretamente na água sem interagir com material suspenso ou sedimentos, com diluição uniforme até 2,0 metros de profundidade (URBAN & COOK, 1986), enquanto a aplicação de atrazine no campo resultaria em uma concentração de 100 µg L⁻¹ na água, a lavagem de equipamentos e embalagens diretamente nos córregos introduziria quantidades significativamente maiores de produtos fitossanitários nos mananciais.

Durante o processo de pulverização, cerca de metade do produto fitossanitário é perdido (FRIEDRICH, 2004).

No contexto da aplicação de produtos fitossanitários, é fundamental considerar três parâmetros ambientais essenciais: ventos, umidade relativa do ar e temperatura. Esses fatores precisam estar em harmonia com as características técnicas da aplicação, como tipo de bico de pulverização, velocidade do equipamento aplicador, pressão de trabalho, o alvo a ser tratado, condições do equipamento e a qualificação técnica dos operadores (FERREIRA et al., 2007). Esse desafio pode se tornar mais complexo em grandes áreas de cultivo com alto valor agrícola, onde a aplicação aérea de herbicidas é uma opção.

Em um estudo que envolveu a aplicação de um marcador semelhante a um herbicida pré-emergente no solo, os pesquisadores observaram uma interação significativa entre a velocidade do vento, a ponta de pulverização e a pressão de trabalho, afetando os resultados de deriva. Eles constataram que em condições de vento mais forte, ocorreu uma maior perda do produto devido ao arraste pelo vento. No entanto, também notaram que em muitos casos, a escolha adequada da ponta de pulverização era uma solução mais eficaz para minimizar o impacto negativo do vento do que reduzir a pressão de trabalho (COSTA et al., 2007).

A ponta de pulverização é fundamental na formação e distribuição das gotas durante a aplicação de herbicidas, sendo um componente crucial no equipamento de pulverização. A escolha inadequada da ponta pode levar a perdas significativas do produto e, conseqüentemente, à contaminação de mananciais. É importante evitar o uso de pontas que produzam gotas com diâmetro menor que 100 µm, pois isso aumenta consideravelmente o risco de perdas durante a aplicação (FERREIRA et al., 2007).

Nos campos de produção agrícola, além da perda de herbicidas por deriva, é possível que esses produtos atinjam o solo e sejam transportados para mananciais de diversas maneiras, incluindo escoamento superficial, escoamento subsuperficial e lixiviação. O potencial de lixiviação, em particular, é uma característica crucial de um herbicida relacionada à contaminação de águas subterrâneas, de acordo com critérios estabelecidos pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA, 2023).

O herbicida é classificado com base em sua capacidade de contaminar águas

superficiais usando o método de Goss (GOSS, 1992).

Além das características relacionadas ao transporte, a persistência da molécula do herbicida no ambiente, em sua forma original, desempenha um papel importante na detecção do herbicida em mananciais. Isso é especialmente relevante quando há movimentação vertical no solo, pois a degradação microbiana, a principal forma de decomposição das moléculas de herbicida no ambiente do solo, diminui à medida que o herbicida se afasta da superfície. Além disso, o comportamento das moléculas no solo é afetado por diversos outros fatores, como pH, capacidade de troca de cátions, textura do solo, mineralogia e teor de matéria orgânica, que determinam os processos de adsorção ou desorção do herbicida no solo (VENCILL et al., 2002).

O estudo visa avaliar a movimentação e a persistência dos herbicidas sulfentrazone e imazapic, considerando diferentes tipos de solo e a influência da precipitação (MONQUERO et al., 2010). A intensidade das chuvas e a textura do solo estão diretamente relacionadas com o transporte vertical de herbicidas. Solos de textura média ou arenosos permitem uma maior movimentação dos produtos, o que pode levar à sua detecção posterior em aquíferos, como também foi mencionado (GOMES et al., 2006).

Devido às diferenças nas práticas de manejo e nos herbicidas utilizados, os produtos químicos empregados na cultura da cana-de-açúcar são mais frequentemente detectados na água em comparação com aqueles usados na soja. Essa disparidade é atribuída à maior capacidade de persistência dos herbicidas utilizados em canaviais, resultando em concentrações mais elevadas desses produtos no solo. Mais de 70% dos herbicidas aplicados nessa cultura têm ação residual (VENCILL, 2002; BRASIL, 2023), isso aumenta a probabilidade de perda desses herbicidas para os mananciais.

Algumas situações operacionais nas lavouras, como o relevo, a proteção e a localização do manancial, também têm impacto na presença de herbicidas na água. Em áreas com inclinação acentuada e solo de textura média ou arenosa, juntamente com chuvas intensas, as práticas de preparo do solo podem levar ao carreamento de solo e herbicidas para os córregos (QUEIROZ et al., 2011).

A capacidade de ligação aos componentes da matéria orgânica do solo, bem como a capacidade de adesão a óxidos de ferro, alumínio e argilas, são informações cruciais que influenciam a interação dos herbicidas no solo (TONI et al., 2006). A capacidade de ligação do glyphosate a componentes da matéria orgânica do solo resulta em uma persistência prolongada no ambiente, permitindo sua detecção na água até 60 dias após a aplicação (SILVA et al., 2003).

POTENCIAL DE LIXIVIAÇÃO DO SOLO

Lixiviação é o processo de carregamento vertical do herbicida no solo, ou seja, através do perfil do solo, em profundidade. Volume de chuvas e umidade do solo são fatores

ambientais que influenciam o processo de lixiviação (mais chuvas e mais umidade, maior a tendência de lixiviar). Além disso, propriedades do solo e dos herbicidas, relacionados aos processos de retenção no solo, também influenciam a lixiviação (maior retenção, menor lixiviação), como será discutido a seguir. CARVALHO (2013).

A lixiviação desempenha um papel fundamental na incorporação superficial da maioria dos herbicidas, permitindo que eles alcancem sementes ou plântulas durante a germinação. Esse processo pode influenciar significativamente a eficácia dos herbicidas no controle de plantas específicas, tornando-os mais ou menos eficazes, dependendo da eficiência da lixiviação (OLIVEIRA, 2001).

Embora a lixiviação seja fundamental para a incorporação superficial de herbicidas, pesquisas indicam que também pode diminuir a persistência desses compostos ao transportá-los para camadas mais profundas do solo, onde as raízes das plantas vegetais e culturas têm acesso limitado. Isso resulta na redução da eficácia dos herbicidas e no potencial de danos às culturas subsequentes (FERRI & VIDAL, 2003).

O excesso de lixiviação pode levar à contaminação do lençol freático por herbicidas em muitos casos. Portanto, compreender o potencial de lixiviação dos herbicidas pode ser útil na criação de formulações que reduzam as perdas por lixiviação desses compostos no solo, contribuindo para a preservação do meio ambiente e a gestão mais eficiente dos herbicidas (WAUCHOPE et al., 1990; GISH et al., 1994).

O potencial de lixiviação de um herbicida pode ser avaliado por meio de técnicas de lisímetro (WINTON & WEBER, 1996), a cromatografia de camada delgada de solo refere-se a uma técnica de análise que envolve a separação e identificação de componentes presentes no solo usando uma camada fina de material adsorvente (HELLING, 1971; SANCHEZ-MARTIN et al., 1994), como alternativa a métodos de avaliação caros e que requerem manutenção dispendiosa, é possível utilizar amostras deformadas em colunas de solo para realizar avaliações, oferecendo uma opção mais acessível e prática (SOUZA et al., 2000; INOUE et al., 2002; BACHEGA et al., 2009), é possível realizar avaliações usando amostras deformadas em colunas de solo, juntamente com a semeadura de espécies vegetais sensíveis ao herbicida de interesse, conhecidas como bioindicadoras. Esse método oferece uma alternativa acessível e prática para a avaliação de herbicidas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A lixiviação é uma característica importante a ser considerada no contexto do uso de herbicidas no solo. A lixiviação refere-se à aplicação dos herbicidas através do solo, carreando-os para camadas mais profundas ou mesmo atingindo o lençol freático. Isso pode representar um risco significativo para o meio ambiente, uma vez que os herbicidas podem contaminar águas subterrâneas e, eventualmente, atingir corpos de água superficiais, afetando a biodiversidade aquática e a qualidade da água potável.

O potencial de lixiviação de um herbicida depende de vários fatores, incluindo suas características químicas, as propriedades do solo e as práticas de aplicação, herbicidas com alta solubilidade em água e baixa adsorção ao solo têm maior probabilidade de lixiviar. Portanto, é fundamental escolher herbicidas protegidos, considerar as condições do solo e aplicar as boas práticas agrícolas para minimizar os riscos de lixiviação.

Além disso, é crucial avaliar o impacto a longo prazo do uso de herbicidas no solo, considerando as possíveis consequências para a saúde do solo, a microbiota e a capacidade de retenção de nutrientes. Isso pode afetar a sustentabilidade das práticas agrícolas.

Em resumo, a lixiviação e o potencial dos herbicidas no solo são questões críticas a serem levadas em consideração na agricultura moderna. O uso responsável de herbicidas, a seleção adequada de produtos e a adoção de práticas sustentáveis são essenciais para minimizar os impactos negativos no solo e no meio ambiente.

REFERÊNCIAS

ARMAS, E.D. et al. **Diagnóstico espaçotemporal da ocorrência de herbicidas nas águas superficiais e sedimentos do Rio Corumbataí e principais afluentes**. Química Nova, v.30, n.5, p.1119-1127, 2007.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALIZATION. NF X 31-211: **Caractérisation des déchets: essai de lixiviation d'un déchet solide initialement massif ou généré par un procédé de solidification**. Paris, 2012.

BACHEGA, T. F. et al. **Lixiviação de sulfentrazone e amicarbazone em colunas de solo com adição de óleo mineral**. Planta Daninha, v.27, n.2, p. 363-370, 2009.

BARIZON, R. R. M. et al. **Simulação do transporte e da sorção de imazaquin em colunas de solo**. R. Bras. Ci. Solo, v.30, n.4, p.615-623, 2006.

BRASIL: MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. AGROFIT - **Sistema de Agrotóxicos Fitossanitários**. Disponível em: http://extranet.agricultura.gov.br/agrofit_cons/principal_agrofit_cons. Acesso em: 17 de setembro de 2023.

BRITTO, F.B. et al. **Herbicidas no alto Rio Poxim, Sergipe e os riscos de contaminação dos recursos hídricos**. Revista Ciência Agronômica, v.43, n.2, p.390-398, 2012.

BRUM, C.S.; FRANCO, A.A.; JUNIOR, R.P.S. **Degradação do herbicida sulfentrazone em dois solos de Mato Grosso do Sul**. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/3hqV9kXvBv4h4Dm7BT/h6MSq/?lang=pt>. Acesso em: 10 de outubro de 2023.

CAI, D.W. **Understand the role of chemical pesticides and prevent misuses of pesticides**. Bulletin of Agricultural Science and Technology, v.1, n.6, p.36-38, 2008.

CARTER, A. D. **Herbicide movement in soils: principles, pathways and processes**. Weed Res., v.40, n.1, p.113-122, 2000.

CARVALHO, Leonardo Bianco de. *Herbicidas*. 1ª edição, 2013.

CERDEIRA, A.L. et al. **Metodologia analítica de resíduo do herbicida 2,4-D (ácido 2,4-diclorofenoxiacético) em amostras de água em área de cultivo de cana-de-açúcar**. *Pesticidas: Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente*, v.12, n.1, p.99-110, 2002.

COSTA, A.G.F. et al. **Efeito da intensidade do vento, da pressão e de pontas de pulverização na deriva de aplicações de herbicidas em préemergência**. *Planta Daninha*, v.25, n.1, p.203-210, 2007.

DORES, E.F.G.C. et al. **Multiresidue determination of herbicides in environmental waters from Primavera do Leste Region (Middle West of Brazil) by SPE-GC-NPD**. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, v.17, n.5, p.866-873, 2006.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Dados de produção mundial**. Disponível em: <<http://faostat.fao.org/site/567/default.aspx#ancor>>. Acesso em: 18 de setembro de 2023.

FERREIRA, L.R. et al. **Tecnologia de aplicação de herbicidas**. In: SILVA, A. A.; SILVA, J. F. (Eds.). *Tópicos em manejo de plantas daninhas*. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2007. p.326-367.

FERRI, M. V. W.; VIDAL, R. A. **Persistência do herbicida acetochlor em função de sistemas de preparo e cobertura com palha**. *Ci. Rural*, v. 33, n. 3, p.399-404, 2003.

FILIZOLA, H.F. et al. **Monitoramento de agrotóxicos e qualidade das águas em área de agricultura irrigada**. *Revista Brasileira de Agrociência*, v.11, n.2, p.245-250, 2005.

FLURY, M. **Experimental evidence of transport of pesticides through field soils - a review**. *Journal of Environmental Quality*, v.25, n.2, p.25-45, 1996.

FRIEDRICH, T. **Quality in pesticide application technology**. In: RAETANO, C.G.; ANTUNIASSI, U.R. *Qualidade em tecnologia de aplicação*. Botucatu: Fepaf, 2004. p.93-109.

GISH, T. G.; SHIRMOHAMMADI, A.; WIENHOLD, B. J. **Field-scale mobility and persistence of commercial and starch-encapsulated atrazine and alachlor**. *J. Environ. Qual.*, v.23, p.355-359, 1994.

GOMES, M.A.F. et al. **Movimento do herbicida tebutiuron em dois solos representativos das áreas de recarga do aquífero Guarani**. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.10, n.2, p.479-483, 2006.

GIANESSI, P.L. **The Increasing Importance of Herbicides in Worldwide Crop Production**. *Pest Management Science*, v.69, n.10, p.1099-1105, 2013.

GOSS, D.W. **Screening procedure for soils and pesticides for potential water quality impacts**. *Weed Technology*, v.6, n.11, p.701-708, 1992.

HELLING, C. S. **Pesticide mobility in soils**. III. Influence of soil properties. *Soil Sci. Soc. Am. Proc*, v.35, p.743-748, 1971.

- HILLEBRAND, O. et al. Chemograph analysis of two herbicides in a German karst aquifer. **Geophysical Research Abstracts**, 2013.
- INOUE, M. H. et al. **Calagem e o potencial de lixiviação de imazaquin em colunas de solo. Planta Daninha**, v.20, n.1, p.125-132, 2002.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Agropecuário**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/agropecuaria/censoagro/>. Acesso em: 19 de setembro de 2023.
- KARAM, D., et al. Efeito residual de herbicidas da cultura da soja sobre o milho safrinha. II. **Herbicidas de pós-emergência**. 1995.
- LEU, C. et al. **Variability of herbicide losses from 13 fields to surface water within a small catchment after a controlled herbicide application**. Environmental Science and Technology, v.38, n.14, p.3835-3841, 2004.
- MANCUSO, M. A. C., et al. “**Efeito residual de herbicidas no solo (‘Carryover’)**”. Revista Brasileira de Herbicidas, v.10, n.2, agosto de 2011, p. 151.
- MARCHEZAN, E. et al. **Rice herbicide monitoring in two brazilian river during the rice growing season**. Scientia Agricola, v.64, n.6, p.131-137, 2007.
- MONQUERO, P.A. et al. **Lixiviação e persistência dos herbicidas sulfentrazone e imazapic**. Planta daninha, v.28, n.1, p.185- 195, 2010.
- MOREIRA, J.C. et al. **Contaminação de águas superficiais e de chuva por agrotóxicos em uma região do estado do Mato Grosso**. Ciência e Saúde Coletiva, v.17, n.6, p.1557-1568, 2012.
- MURRAY, K.E.; SHEEBA, M. T.; BODOUR, A.A. **Prioritizing research for trace pollutants and emerging contaminants in the freshwater environment**. Environmental Pollution, v.158, n.12, p.3462-3471, 2010.
- NWANI, C.D. et al. **Toxicity of the Herbicide Atrazine: Effects on Lipid Peroxidation and Activities of Antioxidant Enzymes in the Freshwater Fish Channa Punctatus (Bloch)**. International Journal of Environmental Research and Public Health, v.7, n.8, p.3298- 3312, 2010.
- OLIVEIRA JR., R. S.; KOSKINEN, W. C.; FERREIRA, F. A. **Sorption and leaching potential of herbicides on Brazilian soils**. Weed Res, v.41, p.97-111, 2001.
- QUEIROZ, G.M.P. et al. **Transporte de glifosato pelo escoamento superficial e por lixiviação em um solo agrícola**. Química Nova, v.34, n.2, p.190-195, 2011.
- RODRIGUES, B. N.; ALMEIDA, F. L. S. **Guia de herbicidas**. Londrina, 6ª ed., 2011. 697p.
- ROMAN, E. S. et al. **Como funcionam os herbicidas da biologia à aplicação**. Gráfica Editora Berthier, 2005.
- ROSSI, C. V. S. et al. **Mobilidade do sulfentrazone em Latossolo Vermelho e em Chernossolo**. Planta Daninha, v.23, n.4, p.701-710, 2005.

- ROHR, J.R.; McCOY, K.A. A. **Qualitative Meta-Analysis Reveals Consistent Effects of Atrazine on Freshwater Fish and Amphibians - A Review**. Environmental Health Perspectives, v.118, n.1, p.20-32, 2010.
- SANCHEZ-MARTIN, M. J.; CRISANTO, T.; ARIENZO, M. **Evaluation of the mobility of C14- labelled pesticides in soils by thin layer chromatography using a linear analyser**. J. Environ. Sci. Health, Part B, v.3, p.473-484, 1994.
- SANTOS, E. A. D. et al. **Resíduos de herbicidas em corpos hídricos - Uma revisão**. Revista Brasileira de Herbicidas, v.12, n.2, p.188-201, mai./ago. 2013.
- SILVA, D.R.O. et al. **Monitoramento de agrotóxicos em águas superficiais de regiões orizícolas no sul do Brasil**. Ciencia Rural, v.39, n.9, p.2383-2389, 2009.
- SILVA, M.D.; PERALBA, M.C.R.; MATTOS, M.L.T. **Determinação de glifosato e ácido aminometilfosfônico em águas superficiais do arroio passo do pilão**. Pesticidas: Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente, v.13, n.1, p.19-28, 2003.
- SILVA, M.S. et al. **Efeito da associação do herbicida clomazone a nanoesferas de alginato/quitosana na sorção em solos**. Disponível em: <https://www.scielo.br/l/jqn/a/XPbqrrdWwP5fmvJ3jQWtrdS/?lang=pt/>. Acesso em: 10 de outubro de 2023.
- SINDAG - Sindicato Nacional da Indústria de Produtos para Defesa Agrícola. Disponível em <http://www.sindag.com.br/>. Acesso em: 13 de setembro de 2023.
- SOUTHWICK, L. M. et al. **Potential influence of sugarcane cultivation on estuarine water quality of Louisiana's gulf coast**. J. Agric. Food Chem., v.50, n.15, p.4393-4399, 2002.
- SOUZA, A. P. et al. **Lixiviação de glyphosate e imazapyr em solos com diferentes texturas e composição química. I. Método do bioensaio**. Planta Daninha, v.18, n.1, p.5-16, 2000.
- TANABE, A. et al. **Seasonal and special studies on pesticide residues in surface waters of the Shinano river in Japan**. J. Agric. Food Chem., v.49, n. 7, p.3847-3852, 2001.
- TAVELLA, L.B. et al. **O uso de agrotóxicos na agricultura e suas consequências toxicológicas e ambientais**. Agropecuária Científica no Semiárido, v.7, n.2, p.6-12, 2011.
- TSAI, W. **A review on environmental exposure and health risks of herbicide paraquat**. Toxicology Environmental Chemistry, v.95, n.2, p.197-206, 2013.
- URBAN, D.J.; COOK, N.J. **Hazard Evaluation Division - Standard Evaluation Procedure Ecological Risk Assessment**, U.S. EPA Publication 540/9-86-001, 1986.
- USEPA. United States Environmental Protection Agency. **Integrated Risk Information System**. Disponível em: <http://www.epa.gov/iris/index.html>. Acesso em: 15 de setembro de 2023.
- VELINI, E. D. **Comportamento de herbicidas no solo**. In: SIMPÓSIO NACIONAL SOBRE MANEJO DE PLANTAS DANINHAS EM HORTALIÇAS, 1992, Botucatu. Resumos... Botucatu: 1992. p.44-64.
- VENCILL, V.K. **Herbicide Handbook**, 8th ed.; Weed Science Society of America: Lawrence, KS, 2002, 430 p.

VIVIAN, R. et al. **Persistência e lixiviação de ametryn e trifloxysulfuron-sodium em solo cultivado com cana-de-açúcar.** Planta Daninha, v.25, n.1, p. 111-124, 2007.

WAUCHOPE, R. D.; WILLIAMS, R. G.; MARTI, L. R. **Runoff of sulfometurom-methyl and cyanazine from small plots: effects of formulation and grass cover.** J. Environ. Qual, v.19, n.1, p.119-125, 1990.

WINTON, K.; WEBER, J. B. **A review of field lysimeter studies to describe the environmental fate of pesticides.** Weed Technol, v.10, p.202-209, 1996.