

ESTUDOS DE CASO NO

Ensino de Ciências da Natureza 1

Química em Foco



ORGANIZADORES:

- Salete Linhares Queiroz
- Caio Moralez de Figueiredo

Autoras e autores

Adriana Gruli de Melo
Arthur Moraes Franco da Rocha
Caio Moralez de Figueiredo
Cyntia Vasconcelos de Almeida
Daniel Yanke Brasilino
Eduardo Orlando Bartaquim
Evelin Ribeiro Cardoso
Felipe Santana Pena
Giovane Santos dos Reis
Gustavo Vasconcelos Gomes
Helainy Wanyessy Kenya Rodrigues Silva Chagas
Iuri Neves Soares
Kleyton Junior Gomes de Morais

Letícia Tagliavini de Assis
Lucas Freitas Feitosa
Matheus Gotha
Natália Wolf de Faria
Pablo Abreu Alves
Pedro Augusto Sponchiado
Priscila Martini de Souza
Rafael Cava Mori
Renata Almeida Chagas
Ricardo Matos
Salette Linhares Queiroz
Thiago Wedson Hilario
Winnie Evelyn Valeria Perez Vite

Organizadores

Salette Linhares Queiroz
Caio Moralez de Figueiredo

Projeto gráfico e Diagramação

Diagrama Editorial

Capa

Eldes de Paula Oliveira

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

E82 Estudos de caso no ensino de ciências da natureza 1 [recurso eletrônico]: Química em foco / organizado por Salette Linhares Queiroz, Caio Moralez de Figueiredo. - São Carlos : Diagrama Acadêmico, 2025. 139 p. ; PDF ; 1,6 MB.

Vários autores.
Inclui índice e bibliografia.
ISBN: 978-65-995167-7-1 (Ebook)

1. Química. 2. Educação. 3. Formação de professores. I. Queiroz, Salette Linhares. II. Figueiredo, Caio Moralez de. III. Título.

2025-4478

CDD 540
CDU 54

Elaborado por Odílio Hilario Moreira Junior - CRB-8/9949

Índice para catálogo sistemático:

1. Química 540
2. Química 54



Rua XV de Novembro, 2190, sala 8
Telefone/WhatsApp: (16) 99614-8949
CEP 13560-240 - São Carlos/SP
www.diagramaeditorial.com.br

CAPÍTULO 3

ESTUDO DE CASO: **AGROTÓXICOS, DO USO AO ABUSO**

KLEYTON JUNIOR GOMES DE MORAIS¹MATHEUS GOTHA²RAFAEL CAVA MORI³

O Senhor Sem-Floresta cultiva vegetais e grãos em uma extensa propriedade, em Aripuanã, pequena cidade do interior do Mato Grosso. Defensor do uso de agrotóxicos para obter colheitas mais abundantes, sempre foi conhecido por seus bordões, que pregava ao contemplar seus frutos, brilhantes como bolas de boliche recém-polidas:

– Lucro acima de tudo!

A chegada do pesticida fipronil ao mercado, com a promessa de incrementar ainda mais as produções, entusiasmou o Senhor Sem-Floresta. Mas, dada a dimensão de seu latifúndio, a aplicação da substância demandaria muito tempo se feita pelo método convencional, com um trator pulverizador. Assim, visando acelerar o processo, o proprietário ordenou que seus empregados utilizassem seu aeroplano:

– *Pra* jogar o pesticida, só com avião! Tempo é dinheiro! – bufou, encerrando com mais um bordão.

– Mas, senhor... por acaso, a pulverização aérea não é proibida? – questionou, como que pisando em ovos, um de seus funcionários.

– Ninguém vai ficar sabendo. Pode confiar! – exclamou o fazendeiro, impassível.

Ocorre que, nas proximidades das terras do Senhor Sem-Floresta, há uma reserva ambiental, detentora de uma grande biodiversidade de vegetação e de animais silvestres. E, depois de algumas semanas, enquanto a vida florescia na

1 Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Química do Instituto de Química de São Carlos da Universidade de São Paulo.

2 Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Química do Instituto de Química de São Carlos da Universidade de São Paulo.

3 Docente na Universidade Federal do ABC.

plantação, na reserva, definhava – inclusive, tendo morrido dois cervos, após pastarem próximo à divisa.

Não demorou para que o Senhor Sem-Floresta se tornasse alvo das autoridades ambientais. Estas, inspecionando a fazenda, confirmaram que o uso excessivo de pesticidas e a aplicação ilegal por via aérea levaram à contaminação de parte do solo da reserva.

– O senhor tem noção do estrago que fez? – indagou o agente do órgão ambiental.

Respondeu o fazendeiro em tom zombeteiro:

– Não tenho culpa de nada, tá ok?

Mas a punição foi severa: uma grande multa e a notificação sobre a necessidade de reversão dos danos causados à área de proteção ambiental. Diante da pressão governamental e, principalmente, da insatisfação popular (afinal, a notícia logo se espalhou entre os camponeses), o homem, ainda que relutantemente, decidiu agir. Para resolver seus problemas, ele contratou dois químicos, Doutora Flora e Doutor Fauna, especialistas em agricultura sustentável e remediação ambiental.

Colocando-se no lugar dos químicos contratados, proponha ao Senhor Sem-Floresta maneiras de reverter a contaminação causada à reserva ambiental, argumentando a favor de uma delas.

3.1 APONTAMENTOS DIDÁTICOS

O caso aproxima os alunos de um tema relevante, as consequências ecológicas do uso descontrolado de produtos químicos nas lavouras, especialmente quando elas estão próximas a áreas protegidas. Favorece, também, a discussão sobre a busca de uma agricultura mais sustentável, com menores impactos ao meio, promovendo um debate sobre o papel das normas legais e da fiscalização na mitigação de danos ambientais.

Especificamente, o caso abrange a contaminação ambiental pelo pesticida fipronil ($C_{12}H_4Cl_2F_6N_4OS$), pertencente à família dos fenilpirazóis e sendo ingrediente ativo de vários agrotóxicos⁴. Essa substância tem sido largamente utilizada na agricultura para o controle de insetos como formigas, pulgas, carrapatos,

4 Renan do Carmo Marinho Silva, Priscila Aparecida Della Torre e Janara de Camargo Matos, “O uso incorreto do inseticida fipronil e sua influência na morte das abelhas no sul do Brasil”, *Processando o Saber*, vol. 13, pp. 93-110, 2021. <https://zenodo.org/records/15066810>

cupins e besouros, matando-os ao interferir em seu sistema nervoso central⁵. Por sua alta persistência no ambiente, os pesticidas apresentam elevado potencial de contaminar ecossistemas próximos às áreas de cultivo, como as reservas ambientais, não sendo diferente com o fipronil. A contaminação relatada no estudo de caso afeta também a fauna, pois, embora seja muito mais tóxico para insetos do que para mamíferos, deve-se evitar a exposição prolongada ou demasiada desses animais à substância⁶. Afinal, o contato direto do inseticida com a pele e os olhos pode acarretar irritações, e sua ingestão pode provocar náusea, vômito, dor de cabeça, fraqueza e convulsões. A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos classifica o fipronil como um possível carcinógeno, com base em estudos que observaram o desenvolvimento de tumores na tireoide de ratos.

Desde 2023, a aplicação de fipronil por pulverização foliar em área total foi suspensa pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, permitindo-se apenas a aplicação em solo ou diretamente nas plantas⁷. Apesar da proibição, acredita-se que a pulverização aérea do pesticida ainda ocorra, o que pode levar à morte de insetos polinizadores, à contaminação de reservas ambientais e à diminuição da biodiversidade. Outros países, como Colômbia, Uruguai, Costa Rica, Vietnã, África do Sul e toda a União Europeia, baniram o uso da substância, que está proibida apenas em alguns estados brasileiros. Entretanto, em uma audiência pública na Câmara dos Deputados, foi proposto o Projeto de Lei n. 4.592/2023, que dispõe sobre a proibição de aplicação foliar do princípio ativo fipronil em todo território nacional⁸. A discussão prossegue no Parlamento brasileiro e, embora não se possa prever seu desfecho, é fato que o uso dos agrotóxicos com base no fipronil mostra-se cada vez mais criticado e desincentivado, estando mais próximo de uma possível proibição.

O emprego de casos investigativos no ensino está associado à chamada Aprendizagem Baseada em Problemas, estratégia que busca envolver os alunos de modo a que se apropriem do conhecimento a partir de reflexões coletivas, enquanto lidam com problemas complexos e autênticos. Em realidade, este caso pode ser classificado como uma forma de *well-structured problem* (“problema

5 National Pesticide Information Center, “Fipronil general fact sheet”, *National Pesticide Information Center*, disponível em: <https://npic.orst.edu/factsheets/fipronil.html>. Acesso em 13 ago. 2025.

6 Hyllana Catherine Dias de Medeiros, “Efeitos do fipronil sobre o metabolismo energético no fígado perfundido de rato”, dissertação de mestrado, Araçatuba, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2014.

7 Brasil, Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, “Ibama suspende cautelarmente aplicação de agrotóxicos à base de fipronil”, 2 jan. 2024, disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/notas/2024/ibama-suspende-cautelarmente-aplicacao-de-agrotoxicos-a-base-de-fipronil>. Acesso em 13 ago. 2025.

8 Brasil, Câmara dos Deputados, “Projeto de lei nº 4592/2023”, disponível em: https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/prop_mostrarintegra?codteor=2331307. Acesso em 13 ago. 2025.

bem-estruturado”)⁹, pela maneira como direciona o estudante à resolução, mas sem que apresente uma única resposta correta.

Considerando que o caso está relacionado com a área da toxicologia, ele pode ter lugar entre as atividades de diversos componentes curriculares de cursos de graduação, não só de química, mas também de áreas próximas, como engenharias química, ambiental e agrônoma. Na graduação em química ou engenharia química, principalmente em cursos que possibilitam a ênfase em química ambiental, o caso pode ser aplicado em componentes curriculares como Química Ambiental, Química do Solo, Ecotoxicologia ou Toxicologia Ambiental e Poluentes Químicos ou Poluentes Ambientais. Na engenharia ambiental, há cursos que ofertam o componente Recuperação de Áreas Degradadas, também muito propício ao estudo deste caso, assim como Química e Fertilidade do Solo, presente em matrizes curriculares da engenharia agrônoma.

Não se deve ignorar que, diante de novas diretrizes curriculares nacionais para cursos de graduação, muitas instituições implementaram a curricularização da extensão, levando ao surgimento de componentes que, ao fomentarem uma relação comunicativa com a comunidade externa àquela da instituição de educação superior, também podem propiciar a aplicação do caso, inclusive de forma prática e emancipatória¹⁰. A Universidade Federal do ABC, por exemplo, atualmente oferta o componente curricular Práticas de Agroecologia: De(s)colonizando Saberes sobre Manejo e Cultivo em Solos Tropicais, para os cursos de licenciatura em educação do campo, licenciatura em história e licenciatura em ciências humanas, mas passível de receber graduandos em química e engenharia. Esse componente tem como objetivo problematizar as vertentes hegemônicas da produção agrícola, notadamente, aquelas relacionadas ao agronegócio, instrumentalizando os estudantes a criarem intervenções ético-políticas baseadas no paradigma agroecológico, alternativamente à produção da agricultura industrial. Ora, sendo essa produção fortemente baseada no latifúndio, na mecanização, na transgenia e nos agrotóxicos¹¹, fica evidente a pertinência deste caso também nesse contexto.

9 Luciana Passos Sá, Ana Cláudia Kasseboehmer e Salete Linhares Queiroz, “Casos investigativos de caráter sociocientífico: aplicação no ensino superior de Química”, *Educación Química*, vol. 24, n. extraordinário 2, pp. 522-528, 2013. [https://doi.org/10.1016/S0187-893X\(13\)72523-0](https://doi.org/10.1016/S0187-893X(13)72523-0)

10 Paulo Freire, *Extensão ou comunicação?*, Rio de Janeiro, Paz e Terra, 1977.

11 Roseli Salete Caldart, Isabel Brasil Pereira, Paulo Alentejano e Gaudêncio Frigotto (orgs.), *Dicionário da educação do campo*, Rio de Janeiro/São Paulo, Escola Politécnica de Saúde Joaquim Venâncio/Expressão Popular, 2012.

Ressalta-se que habilidades e atitudes passíveis de desenvolvimento a partir da aplicação do caso vão plenamente ao encontro do preconizado nas atuais Diretrizes Curriculares Nacionais para os Cursos de Química¹².

3.2 CARACTERÍSTICAS DO CASO E CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

Existem alguns critérios que, uma vez cumpridos, caracterizam um bom caso, conforme Herreid *et al.*¹³ O mais importante dos critérios diz respeito ao desenvolvimento de pensamento crítico. Assim, o caso foi estruturado de forma a fomentar discussões em sala de aula, colocando os alunos no lugar dos químicos contratados para reverter os danos causados pelo pesticida. Então, os alunos são desafiados não só a resolver o problema, mas também a argumentar a favor de suas soluções. Esse exercício abre espaço para o debate e o desenvolvimento da criticidade.

O segundo fator essencial para a caracterização de um bom caso diz respeito aos próprios aspectos narrativos, sendo importante que, para os alunos, a história seja atrativa e sucinta. Como o caso apresenta elementos que despertam a empatia – expondo os problemas ambientais causados pela ganância de um fazendeiro – os estudantes são convidados a buscar não apenas soluções técnicas, mas também a considerar aspectos éticos e humanísticos em suas decisões. Ademais, a história também conta com elementos de fluidez, apresentando uma narrativa simples e a inserção de falas, que a dinamizam.

O terceiro critério é a relevância do problema proposto para o público-alvo do caso. Como já afirmado na seção anterior, a narrativa abrange uma questão ambiental e, nos cursos de química, as próprias diretrizes curriculares tratam de valorizá-la e de tomá-la como elemento imprescindível e transversal às matrizes curriculares. Em muitos desses cursos, a química ambiental se materializa inclusive como componente curricular, tanto no bacharelado, quanto na licenciatura – e, assim, o caso proposto pode ser um excelente recurso pedagógico na formação desses químicos.

Um bom caso deve também ser atual, ou seja, incidir sobre um problema recorrente, comum a diversas realidades e carente de uma solução urgente. Pelo seu tema, o caso cumpre esse critério: de todos os países, o Brasil possui a terceira

12 Brasil, Ministério da Educação, “Diretrizes Curriculares Nacionais para os Cursos de Química”, disponível em: https://portal.mec.gov.br/cne/arquivos/pdf/2001/pces1303_01.pdf. Acesso em 13 ago. 2025.

13 Clyde Freeman Herreid *et al.*, “What makes a good case, revisited: the survey monkey tells all”, *Journal of College Science Teaching*, vol. 46, n. 1, pp. 60-65, 2016.

maior produção agrícola, mas é o campeão em consumo de agrotóxicos (especialmente herbicidas, seguidos de inseticidas e fungicidas), o que tem contribuído sobremaneira para a contaminação do solo em muitas das regiões brasileiras¹⁴.

Outro critério diz respeito à extensão do caso, sendo preferíveis os casos curtos, com narrativas fluidas. Além disso, um bom caso deve gerar conflitos e conduzir à tomada de posição. De fato, o caso apresentado cumpre esses dois critérios e, com relação ao último, prevê-se que sua resolução requeira, dos estudantes, que assumam posicionamentos. Afinal, o caso se desenrola a partir de um abuso no emprego de agrotóxicos, e espera-se que as soluções possam levar ao questionamento das próprias bases da atual produção agrícola brasileira.

O Brasil, historicamente, firmou-se como um país de economia dependente, sendo boa parte de sua produção agrícola voltada para a exportação, a partir do binômio latifúndio/monocultura. A modernização desse modelo produtivo se assentou na mecanização e no emprego de uma ampla diversidade de agrotóxicos, o que inclusive dificulta a avaliação de seus impactos sobre ambiente e saúde. No caso dos inseticidas, seu uso indiscriminado pode ter uma consequência que se volta diretamente contra a própria produção agrícola: a morte de insetos polinizadores, especialmente abelhas, levando a fenômenos como o distúrbio do colapso de colônias, o súbito desaparecimento de populações inteiras de colmeias¹⁵.

Assim, a resolução do caso pode colaborar para o questionamento desse modelo, e para que os estudantes conheçam outras perspectivas para a produção agrícola, como a agroecologia, “uma disciplina que fornece os princípios ecológicos básicos para estudar, desenhar e manejar agroecossistemas produtivos e conservadores dos recursos naturais, apropriados culturalmente, socialmente justos e economicamente viáveis” (p.9)¹⁶. A agroecologia se diferencia por considerar os conhecimentos acumulados historicamente pelas populações camponesas, os direitos dos trabalhadores da agricultura e a necessidade de levar, aos consumidores, produtos de qualidade: aqueles que, visando a atender as necessidades humanas sem atentar contra a saúde, provenham de uma produção que respeite os ciclos naturais e as relações ecológicas.

14 Bárbara Bermudes Siqueira e Thaiany Souza Canal Bressiani, “O uso de agrotóxicos e os impactos na saúde do trabalhador rural: uma revisão sobre o herbicida glifosato”, *Vértices*, vol. 25, n. 2, e25218576, 2023. <https://doi.org/10.19180/1809-2667.v25n22023.18576>

15 Simon G. Potts *et al.*, “Declines of managed honey bees and beekeepers in Europe”, *Journal of Apicultural Research*, vol. 49, n. 1, pp. 15-22, 2010. <https://doi.org/10.3896/ibra.1.49.1.02>

16 Miguel Altieri, *Agroecologia: bases científicas da agricultura sustentável*, Montevidéu, Nordan-Comunidad, 1999.

3.3 FONTES DE INSPIRAÇÃO NA PRODUÇÃO DO CASO

O caso foi inspirado em duas notícias reais: um acontecimento na reserva indígena Apyterawã, em 2019; e outro no pantanal sul-mato-grossense, na região de Abobral, dois anos depois. Nenhum dos eventos envolveu o fipronil, e sim outros agrotóxicos, utilizados com finalidade semelhante.

O portal *Mongabay* (especializado em notícias sobre conservação ambiental), em matéria escrita pela jornalista Jenny Gonzales, relata o caso de 2019, quando o Ibama realizou uma operação na Amazônia após imagens de satélite apontarem a expansão do desmatamento de regiões próximas a reservas ambientais¹⁷. Após uma investigação, o órgão descobriu que agrotóxicos, mais especificamente herbicidas desfolhantes, estavam sendo pulverizados na mata por um aeroplano, prática proibida, mas dificilmente fiscalizável.

Já os eventos de 2021 foram relatos no portal G1, pelo jornalista José Câmara¹⁸. Naquele ano, 20 animais silvestres, incluindo duas onças pintadas, foram encontrados mortos em uma reserva situada dentro de uma fazenda do pantanal sul-mato-grossense. A Polícia Federal foi acionada e os peritos constataram que os animais morreram de intoxicação severa, por um agrotóxico à base de carbofurano. Praguicidas com essa substância são tão tóxicos que acabaram proibidos, no país, desde 2017.

3.4 SOLUÇÕES PARA O CASO E CONTEÚDOS DE QUÍMICA EM PAUTA

A contaminação da reserva por fipronil pode ser mitigada pela utilização de técnicas que transformem, degradem e/ou neutralizem o contaminante. Dessa forma, a remediação (degradação e imobilização química) e a biorremediação (microbiana e fitorremediação) surgem como soluções possíveis, e viáveis, para o caso. Essas abordagens favorecem a restauração da qualidade do solo e da água, promovendo a recuperação do habitat natural da fauna e flora, e, portanto, da biodiversidade.

17 Jenny Gonzales, “Chemical defoliants sprayed on Amazon rainforest to facilitate deforestation in Brazil”, *Mongabay*, 19 jan. 2019, disponível em: <https://news.mongabay.com/2022/01/pesticides-released-into-brazils-amazon-to-degrade-rainforest-and-facilitate-deforestation/>. Acesso em 13 ago. 2025.

18 José Câmara, “Onças e outros 18 animais foram mortos envenenados com agrotóxico ilegal, no Pantanal, diz PF”, *G1*, 24 mai. 2021, disponível em: <https://g1.globo.com/ms/mato-grosso-do-sul/noticia/2022/05/24/oncas-e-outros-18-animais-silvestres-foram-mortos-envenenados-com-agrotoxico-ilegal-no-pantanal-diz-pf.ghtml>. Acesso em 13 ago. 2025.

3.4.1 BIORREMEDIAÇÃO MICROBIANA

A biorremediação microbiana consiste em uma técnica de remediação ambiental que utiliza organismos como bactérias e fungos para transformar, degradar ou neutralizar poluentes químicos ambientais¹⁹. Esses microrganismos interagem com os contaminantes, propiciando a sua decomposição em produtos menos tóxicos ou mais fáceis de serem degradados.

A técnica é considerada uma solução ecologicamente sustentável, uma vez que dispensa o uso de processos físicos ou químicos, considerados mais agressivos e dispendiosos. Além disso, é uma abordagem aplicável tanto a ambientes aquáticos como terrestres. Vale acrescentar que a biorremediação microbiana pode ocorrer espontaneamente, pelos próprios organismos presentes no ambiente, ou pode ser induzida pela adição de microrganismos específicos.

A biorremediação microbiana do fipronil requer espécies próprias, que apresentam genes de codificação de enzimas capazes de realizar a degradação. Microrganismos como *Aspergillus* sp. e *Staphylococcus* sp.²⁰, *Trametes versicolor*²¹, *Bacillus* sp.²², *Streptomyces* sp.²³, *Paracoccus* sp.²⁴ e *Klebsiella* sp.²⁵, mostraram-se capazes de degradar e neutralizar ambientes contaminados com fipronil. O que esses seres unicelulares realizam, assim, é o uso do fipronil como fonte de carbono e nitrogênio para o crescimento ou para a conversão em metabólitos.

- 19 Pankaj Bhatt *et al.*, “Insights into the toxicity and biodegradation of fipronil in contaminated environment”, *Microbiological Research*, vol. 266, 127247, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2022.127247>
- 20 Leticia Pizzul, María del Pilar Castillo e John Stenström, “Degradation of glyphosate and other pesticides by ligninolytic enzymes”, *Biodegradation*, vol. 20, n. 6, pp. 751-759, 2009. <https://doi.org/10.1007/s10532-009-9263-1>
- 21 Jordyn M. Wolfand, Gregory H. LeFevre e Richard G. Luthy, “Metabolization and degradation kinetics of the urban-use pesticide fipronil by white rot fungus *Trametes versicolor*”, *Environmental Science: Processes & Impacts*, vol. 18, pp. 1256-1265, 2016. <https://doi.org/10.1039/C6EM00344C>
- 22 Pankaj Bhatt *et al.*, “Insight into microbial applications for the biodegradation of pyrethroid insecticides”, *Frontiers in Microbiology*, vol. 10, 2019. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.01778>
- 23 Jayanthi Abraham e Anudurga Gajendiran, “Biodegradation of fipronil and its metabolite fipronil sulfone by *Streptomyces rochei* strain AJAG7 and its use in bioremediation of contaminated soil”, *Pesticide Biochemistry and Physiology*, vol. 155, pp. 90-100, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2019.01.011>
- 24 Rajinder Kumar, Balwinder Singh e Vinod Kumar Gupta, “Biodegradation of fipronil by *Paracoccus* sp. in different types of soil”, *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, vol. 88, pp. 781-787, 2012. <https://doi.org/10.1007/s00128-012-0578-y>
- 25 Sayi D. S. *et al.*, “Isolation and molecular identification of pesticide (fipronil) degrading bacteria from mangrove soil”, *Research Journal of Chemistry and Environment*, vol. 24, n. 4, pp. 125-128, 2020.

O processo de biodegradação do fipronil é influenciado por fatores como disponibilidade de oxigênio, presença de nutrientes essenciais e interação com outros compostos na matriz, e sua eficácia depende da adaptação dos microrganismos ao ambiente contaminado, exigindo, muitas vezes, um período de adaptação das comunidades microbianas ao novo substrato tóxico. As espécies listadas no parágrafo anterior têm se mostrado viáveis também quanto a esse aspecto.

Assim, no contexto do estudo de caso, os químicos Doutora Flora e Doutor Fauna podem convencer o Senhor Sem-Floresta a mobilizar a biorremediação microbiana para mitigar a contaminação da reserva ambiental por fipronil. Trata-se de uma técnica economicamente vantajosa e ecologicamente sustentável, oferecendo uma solução a longo prazo para a recuperação da reserva, sem causar mais danos ao meio ambiente.

3.4.2 FITORREMEDIAÇÃO

Outra proposta possível para reverter o problema causado pela contaminação com o fipronil é a fitorremediação, que é análoga à técnica da biorremediação microbiana, mas, no lugar de microrganismos, utiliza plantas específicas para remover, estabilizar ou degradar poluentes tanto no solo quanto na água, sendo uma sugestão eficaz e sustentável para a remediação de áreas contaminadas.

As ações do Senhor Sem-Floresta afetaram uma reserva ambiental. Assim, o método da fitorremediação poderia ser adotado justamente devido à possibilidade de plantas com capacidade de absorver ou metabolizar o contaminante poderem ser introduzidas nas áreas afetadas, sem abalar diretamente o ambiente. Algumas espécies, como *Crotalaria juncea* e *Brassica juncea*, são conhecidas por essa capacidade de acumular e degradar pesticidas e outros contaminantes orgânicos²⁶.

Entre as vantagens da fitorremediação, pode-se destacar seu caráter ecologicamente sustentável, pois essas plantas realizam a absorção do poluente químico por meio de suas raízes. Isso permite que as substâncias poluentes sejam extraídas do solo ao longo do tempo, reduzindo sua concentração gradativamente, sem a necessidade de técnicas agressivas, como a remoção física do solo ou o emprego de outros produtos químicos. Além disso, é um processo de baixo custo, em comparação com os métodos mais invasivos, como a remoção física por escavação e o descarte do solo contaminado²⁷.

26 Ahmed Ali Ali Romeh, “Green silver nanoparticles for enhancing the phytoremediation of soil and water contaminated by fipronil and degradation products”, *Water, Air, & Soil Pollution*, vol. 229, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11270-018-3792-3>

27 Simran Takkar *et al.*, *Green technology: phytoremediation for pesticide pollution*, Amsterdam, Elsevier, pp.353-375, 2022, cap. 17. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85763-5.00008-8>

É necessário, entretanto, reconhecer algumas desvantagens da fitorremediação. Uma das principais limitações é o tempo necessário para que o processo comece a mostrar seus resultados de forma visível, pois, dependendo do nível de contaminação, podem ser necessários meses ou anos até que as plantas consigam remover completamente o pesticida. Obviamente, trata-se de um grande obstáculo, caso se busque uma solução mais imediatista. Além disso, o método é limitado pela profundidade de alcance das raízes, repercutindo em menor efetividade nas áreas onde o poluente químico consegue penetrar profundamente no solo²⁸.

3.4.3 DEGRADAÇÃO E IMOBILIZAÇÃO QUÍMICA

A degradação e imobilização química, empregada em diversos ambientes contaminados, engloba a transformação e neutralização de poluentes em formas menos tóxicas, reduzindo assim seu potencial de mobilidade e, assim, seu impacto no ecossistema e na saúde humana²⁹.

A aplicação da técnica consiste na adição de agentes quimicamente reativos que se ligam aos contaminantes, alterando suas propriedades físico-químicas. Isso resulta na neutralização e transformação dos poluentes em produtos de menor solubilidade e mobilidade, dificultando a sua dispersão e ajudando em sua eliminação. Estudos demonstram que a imobilização química é uma abordagem sustentável, favorecendo a recuperação de áreas contaminadas e, como nos casos da biorremediação microbiana e da fitorremediação, minimizando a necessidade de intervenções mais invasivas, como a remoção física de solos poluídos³⁰.

O que foi apontado, anteriormente, aplica-se ao fipronil, estando atestada a eficácia de sua degradação e imobilização química enquanto solução para seus efeitos contaminantes. Especificamente, a remediação química dessa substância engloba a aplicação de agentes como peróxido de hidrogênio, soluções-tampão e compostos dopados com boro e titânio, que interagem com as moléculas de fipronil e as degradam em formas menos nocivas³¹.

28 Elizabeth Pilon-Smits, “Phytoremediation”, *Annual Review of Plant Biology*, vol. 56, pp. 15-39, 2005. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.56.032604.144214>

29 Lukas Oudejans *et al.*, “Remediating indoor pesticide contamination from improper pest control treatments: persistence and decontamination studies”, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 397, 122743, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122743>

30 Atmakuru Ramesh e Muthukrishnan Balasubramanian, “Kinetics and hydrolysis of fenamiphos, fipronil, and trifluralin in aqueous buffer solutions”, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 47, n. 8, pp. 3367-3371, 1999. <https://doi.org/10.1021/jf980885m>

31 Monica Brienza e Sergi Garcia-Segura, “Electrochemical oxidation of fipronil pesticide is effective under environmental relevant concentrations”, *Chemosphere*, vol. 307, n. 4, 135974, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135974>

Assim, no contexto do estudo de caso, os químicos Doutora Flora e Doutor Fauna podem argumentar com o Senhor Sem-Floresta a favor da remediação por degradação e imobilização química, pois trata-se de uma técnica capaz de mitigar a contaminação da reserva ambiental com a vantagem de proporcionar resultados mais imediatos.

3.5 PARA SABER MAIS

3.5.1 ALTERNATIVAS NA MESA³²

Considerando que os latifúndios e as monoculturas de soja, milho e cana-de-açúcar concentram o uso de 75% dos agrotóxicos consumidos no Brasil, o artigo debate alternativas a esse modelo produtivo, na busca por uma produção menos poluente. Em especial, o texto discute o emprego de tecnologias para otimizar o processo de aplicação dessas substâncias nessas lavouras, mesmo a partir de métodos já estabelecidos, como a pulverização aérea. No final do texto, aborda-se a alternativa agroecológica, no caso das plantações mantidas por pequenos produtores, entendida como uma solução menos poluente e mais capaz de favorecer a economia solidária e os mercados locais.

3.5.2 AGROTÓXICOS PODEM AFETAR A SAÚDE DE TRABALHADORES RURAIS³³

O artigo traz resultados de pesquisas que avaliaram a saúde física e mental de trabalhadores rurais, que relataram estar expostos a quase meia centena de diferentes substâncias, muitas das quais proibidas. Entre relatos de intoxicações em lavouras de tomate, arroz, algodão, soja e milho, pautam-se diversas questões relacionadas ao emprego dos agrotóxicos, como a necessidade de treinamento por parte dos trabalhadores do campo (que enfrentam a chamada exposição ocupacional aos pesticidas), as regulamentações sobre o uso dessas substâncias e os efeitos agudos e crônicos das contaminações.

32 Yuri Vasconcelos, “Alternativas na mesa”, *Revista Pesquisa FAPESP*, set. 2018, disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/alternativas-na-mesa/>. Acesso em 13 ago. 2025.

33 Yuri Vasconcelos e Frances Jones, “Agrotóxicos podem afetar a saúde de trabalhadores rurais”, *Revista Pesquisa FAPESP*, out. 2022, disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/agrotoxicos-podem-afetar-a-saude-de-trabalhadores-rurais/>. Acesso em 13 ago. 2025.