UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

CENTRO DE ENERGIA NUCLEAR NA AGRICULTURA

JULIANA CARLA FONTES

Comportamento do inseticida tiametoxam aplicado via *drench* em plantas de tomate

Piracicaba

2020

JULIANA CARLA FONTES

Comportamento do inseticida tiametoxam aplicado via *drench* em plantas de tomate

Dissertação apresentada ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências

Área de Concentração: Química na Agricultura e no Ambiente

Orientador: Prof. Dr. Valdemar Luiz Tornisielo

Piracicaba

2020

AUTORIZO A DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Técnica de Biblioteca - CENA/USP

Fontes, J. C.
Comportamento do inseticida tiametoxam aplicado via *drench* em plantas de tomate / Juliana Carla Fontes; orientador Valdemar Luiz Tornisielo. - - Piracicaba, 2020.
46 p. : il.

Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Ciências. Área de concentração: Química na Agricultura e no Ambiente) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo, 2020.

1. Absorção 2. Carbono 14 3. Contaminação 4. Controle de pragas 5. Equilíbrio ecológico 6. Inseticidas sistêmicos 7. Tomate 8. Translocação I. Título.

CDU (632.92.024 : 635.64)

Elaborada por:
Marilia Ribeiro Garcia Henyei
CRB-8/3631
Resolução CFB Nº 184 de 29 de setembro de 2017

AGRADECIMENTOS

Ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA) da Universidade de São Paulo (USP), pela infraestrutura e suporte para desenvolvimento desse estudo.

A Syngenta Proteção de Cultivos Ltda pela doação do 14C-tiametoxam para execução desse estudo e pelos 18 meses de incentivo ao meu desenvolvimento profissional, enquanto colaboradora da empresa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 pela concessão de 9 meses de bolsa de estudo, para conclusão desse trabalho.

Ao Prof. Dr. Valdemar Luiz Tornisielo pela orientação, ensinamentos, paciência e confiança durante todo o tempo.

A toda equipe do laboratório de Ecotoxicologia. Em especial a Vanessa Takeshita pela orientação em todas as etapas dessa pesquisa, ao Rodrigo Floriano Pimpinato por sua grande dedicação, desde a paciência com os ensinamentos até a valiosa colaboração com as atividades, aos estagiários Tatiana Edith Laura Ponce e Felipe Madela pelo apoio com a condução do experimento, e a Glaucia Peregrina Olivatto pela amizade e parceria durante esses anos.

À Profa. Dra. Simone da Costa Mello e ao Prof. Dr. Keigo Minami pelo precioso suporte técnico com o manejo do tomateiro, durante a condução do experimento, decisivo para a conclusão.

Ao meu esposo, Victor Hugo Pegoraro Pereira, pela parceria, apoio e incentivo a seguir em busca dos meus sonhos.

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original”

Albert Einstein

RESUMO

FONTES, J. C. **Comportamento do inseticida tiametoxam aplicado via *drench* em plantas de tomate**. 2020. 46 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2020.

A produção de tomate demanda um intenso cuidado fitossanitário. O tiametoxam se destaca por sua eficiência em combater as principais pragas do tomateiro, inclusive vetores de vírus que podem comprometer toda a produção. O objetivo deste estudo foi explorar a sistemicidade do tiametoxam, aplicado via *drench*, em diferentes estádios de desenvolvimento do tomateiro, para compreender o potencial de absorção, translocação e acúmulo da molécula inseticida nas flores e anteras da cultura, uma vez que as matrizes polinizadoras podem ser um dos meios de contaminação para insetos polinizadores. A absorção e translocação do ^{14}C-tiametoxam foi monitorada em plantas de tomate cultivadas em câmara de crescimento. A principal variável desse estudo foi a época de aplicação, já que as plantas de tomate foram tratadas com doses iguais, em três diferentes condições: aplicação única, em duplicata e em triplicata, iniciando no plantio com intervalos de 14 dias. As avaliações foram realizadas em cinco pontos, durante dois meses de cultivo, com foco no florescimento da cultura. O tiametoxam apresentou comportamento sistêmico em tomate-cereja. As plantas mantiveram acumulado, o máximo de 5% do inseticida, ao longo do ciclo. À medida que as plantas foram se desenvolvendo, o tiametoxam já presente na planta foi se distribuindo por toda matéria vegetal disponível. As flores e anteras apresentaram níveis residuais da molécula a níveis baixos, porém persistentes. Em aplicações parceladas observou-se maior persistência da radioatividade ao longo do tempo, inclusive no residual de tiametoxam das flores e anteras, comprovando o potencial de contaminação do tiametoxam em anteras e grãos de pólen, devido ao alto potencial de translocação do inseticida.

Palavras-chave: Absorção. Translocação. Contaminação. Flores. Anteras.

ABSTRACT

FONTES, J. C. **Behavior of thiamethoxam insecticide applied via drench on tomato plants**. 2020. 46 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2020.

Tomato production requires intense plant-health treatments. Thiamethoxam stands out for controlling the main tomato pests, including virus vectors that can affect the entire production. The aim of this study was to explore the systemic approach of thiamethoxam, applied via drench, at different growth stages of tomato, to better understand the potential for absorption, translocation and accumulation of the insecticide molecule in the flowers and anthers of the crop, since the pollinating matrices can be one key contamination for pollinating insects. The absorption and translocation of ^{14}C-thiamethoxam was monitored in tomato plants cultivated in a growth chamber. The main variable of this study was the application timing, since the tomato plants were treated with equal doses, in three different conditions: single, duplicate, and triplicate application, starting at planting with 14 days intervals. The evaluations were carried out at five points, during two months of cultivation, with focus on the flowering of the culture. Thiamethoxam showed systemic behavior in cherry tomatoes. The plants maintained a maximum of 5% of the insecticide accumulated throughout the cycle. As soon as the plant developed, the thiamethoxam already inside were distributed throughout all available plant matter. The flowers and anthers showed low residual levels of the molecule, but persistent. In divided applications, higher persistence of radioactivity over the time was observed, as the residual thiamethoxam of flowers and anthers, proving the potential for thiamethoxam contamination in anthers and pollen grains, due to the high potential for translocation of the insecticide.

Keywords: Absorption. Translocation. Contamination. Flowers. Anthers.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO **12**
2. REVISÃO DA LITERATURA **14**
2.1. Tiametoxam **14**
2.1.1. Características 14
2.1.2. Comportamento nas plantas e no ambiente 14
2.1.3. Risco para polinizadores 16
2.2. Tomaticultura e polinizadores **18**
3. MATERIAL E MÉTODOS **20**
3.1. Solo **20**
3.2. Plantas de tomate **20**
3.3. Delineamento experimental **21**
3.3.1. Tratamentos 22
3.3.2. Avaliações 24
3.3.3. Análise estatística 25
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES **26**
4.1. Avaliações qualitativas **28**
4.2. Avaliações quantitativas **31**
5. CONCLUSÃO **41**
REFERÊNCIAS **42**

1. INTRODUÇÃO

Originário da região andina, na América do Sul, o cultivo do tomate expandiu para outros continentes. Hoje a China é líder na produção da hortaliça, enquanto o Brasil ocupa a oitava posição do ranking mundial, com cerca de 63 mil hectares cultivados e produção que atinge 3,5 milhões de toneladas (MAKISHIMA; MELO, 2019).

A produção de tomate demanda um intenso cuidado fitossanitário. Cerca de 200 organismos já foram relatados alimentando-se de tomateiro, no entanto alguns insetos e ácaros como mosca-branca, pulgões, tripes, traça e lagartas destacam-se como pragas e podem ocorrer durante todo o ciclo da cultura onerando a produção (PRATISSOLI; CARVALHO, 2016). O elevado investimento das lavouras de tomate com insumos agrícolas aliado ao risco de perda da produção pela entrada de uma determinada praga leva o agricultor a aumentar o uso de pesticidas (REIS et al., 2009).

No montante de pesticidas registrados para o tomateiro, o tiametoxam se destaca por sua eficácia em combater as principais pragas, inclusive vetores de vírus que podem comprometer toda a produção. Um inseticida sistêmico do grupo neonicotinoide que atua no receptor nicotínico acetilcolina da membrana celular de insetos, lesando o sistema nervoso e levando-os à morte. Além do controle de pragas, o produto tem efeito bioativador, uma vez que, mesmo na ausência dos insetos, tem promovido aumento em vigor, desenvolvimento e produtividade de cultivos. No mercado há diversos tipos de formulações e modalidades de uso disponíveis para os tomaticultores (MARTINS et al., 2012).

Há diversos relatos na comunidade acadêmica que evidenciam a sistemicidade do tiametoxam em diferentes culturas (DIEZ-RODRIGUEZ, 2006; TORRES; RIGITANO, 2012; HUTH et al., 2012; STONER; EITZER, 2012; GE et al., 2017; RADOLINSK et al., 2019). As principais vantagens de utilizar inseticidas sistêmicos são menor desequilíbrio ecológico, já que pouca quantidade aplicada poderá atingir o inseto-praga via vasos condutores e menor perda por chuvas e irrigação, uma vez que haverá absorção e o residual acumulado na seiva da planta tratada (CORREA, 2018).

Inseticidas altamente eficientes no controle das pragas podem contribuir com a mortalidade de inimigos naturais e polinizadores, como efeito secundário.

As condições de aplicação, como época e modalidade devem ser cuidadosamente estudadas para minimizar o impacto ambiental.

Baseado em pesquisas científicas e em decisões adotadas por outros países, o governo brasileiro atribuiu aos titulares do registro dos inseticidas neonicotinóides algumas medidas, preventivas e restritivas, para segurança dos polinizadores. Em meados de 2012, o processo de reavaliação dos neonicotinóides foi formalizado, com o requerimento de um pacote de estudos e a proibição de uso na época de florescimento das culturas. Cinco anos depois, no ínicio de 2017, o IBAMA publicou Instrução Normativa nº 02/2017 com diretrizes, requisitos e procedimentos para a avaliação dos riscos de ingredientes ativos de agrotóxicos para insetos polinizadores. A norma, destinada a produtos ainda não registrados no país ou em reavaliação foi a primeira a estipular critérios de decisão com base no risco, ou seja, na probabilidade de uma espécie ser afetada pela exposição a agrotóxicos, com objetivo de oferecer mais proteção a abelhas e outros polinizadores (IBAMA, 2018). Segundo Rangel et al. (2018) é consenso entre pesquisadores da área de Manejo Integrado de Pragas que a questão não é provar que os agrotóxicos não matam as abelhas e sim, dentro da perspectiva de proteção a polinizadores, gerenciar o risco ambiental representado por essas tecnologias.

O tomateiro não é uma cultura dependente dos polinizadores, mas as lavouras recebem visitação frequente desses insetos. Apesar da espécie *Solanum lycopersicum* L. apresentar baixa frequência de polinização cruzada os insetos polinizadores contribuem e muito para a produção dos campos (TORRES-RUIZ; JONES, 2012; FRANCESCHINELLI et al., 2013; SILVA-NETO et al., 2017; SALVARREY et al., 2020).

Considerando a grande preocupação a respeito do uso seguro dos neonicotinóides para os polinizadores, o objetivo deste estudo foi explorar a sistemicidade do tiametoxam, aplicado sem contato direto com as flores, em diferentes estádios de desenvolvimento do tomateiro, para compreender o quanto da molécula tem potencial para translocar e acumular nas flores e anteras.

A hipótese desse estudo é que as flores e anteras das plantas de tomate tratadas via *drench*, ainda no florescimento, acumulem um residual baixo de inseticida e que, possa contribuir, em conjunto com outras pesquisas, para a análise de risco para os polinizadores.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Tiametoxam

2.1.1. Características

Os inseticidas do grupo dos neonicotinóides foram descobertos a partir da molécula de nicotina. Os neonicotinóides imitam o efeito da acetilcolina e competem com ela. O excesso de acetilcolina mantém ativação permanente causando hiperexcitabilidade do sistema nervoso central do inseto devido à transmissão contínua e descontrolada de impulsos nervosos o qual entra em colapso levando o inseto a morte (MATIAS, 2016).

As características físico-químicas do tiametoxam indicam que a molécula deve ter alta mobilidade no solo (Koc = 68.4) com base nos parâmetros propostos por Swann et al. (1983). A molécula inseticida mantém-se estável em condições ácidas, mas deve hidrolisar em condições alcalinas. Volatilização não é esperada (Pressão de vapor, Pv = 6.6 x10-6 mPa) mas possui alto potencial de lixiviação devido à alta solubilidade em água (Sw = 4,1 x 10 3 $mg.L^{-1}$ a 25°C) (MACBEAN, 2010). O tiametoxam contém cromóforos que são absorvidos em comprimentos de onda > 290 ηm e, portanto, pode ser suscetível à fotólise direta pela luz solar (LYMAN, 1990).

2.1.2. Comportamento nas plantas e no ambiente

A degradação de tiametoxam nos solos é considerada lenta, com meia vida variando de 65 a 170 dias. Esse processo pode ser potencializado em solos com maior teor de matéria orgânica, de umidade e pH mais alcalino. A molécula inseticida possui potencial moderado a alto para lixiviar para águas subterrâneas. (LI et al., 2018).

Em condições de laboratório, Gupta et al. (2008) observaram uma persistência moderada do tiametoxam no solo, com meia vida de 91 a 94 dias. Os autores notaram ainda uma relação inversamente proporcional entre umidade com persistência da molécula nos solos, indicando alto potencial de lixiviação.

Em solos do cerrado brasileiro, Scorza e Rigitano (2012) observaram uma dissipação inicial mais rápida do tiametoxam nos experimentos a campo, com lixiviação restrita a 50 cm de profundidade, embora o inseticida tenha apresentado

pouca afinidade e alta persistência nos solos em condições de laboratório. Isso indica que há outras variáveis atuantes na degradação das moléculas em condições de campo.

Radolinsk e seus colaboradores (2019) confirmaram a mobilidade do thiamethoxam no perfil do solo. O inseticida aderido em sementes tratadas de milho se movimentou vertical e lateralmente.

A absorção e translocação do tiametoxam em plantas de arroz foram estudadas por Ge et al. (2017). Em condições de laboratório, os autores contaminaram os solos dos vasos de arroz e observaram que a molécula inseticida é absorvida pela planta e acumulada nas folhas. Os autores também observaram a presença do tiametoxam e seu metabólito (clotianidina) em folhas de arroz após aplicação via solo, comprovando a sistemicidade da molécula.

Em mamoeira, Torres e Rigitano (2012) observaram o transporte de tiametoxam tanto no xilema como no floema.

No cafeeiro, aplicações granulares de tiametoxam na projeção da saia apresentaram uniformidade de resíduos nos terços inferior, médio e superior das plantas analisadas (DIEZ-RODRIGUEZ, 2006).

Huth e seus colaboradores (2012) evidenciaram efeito sistêmico ascendente na planta de soja do produto tiametoxam + lambda-cialotrina no controle de *Euschistus heros*. Aplicado via tratamento de sementes, em condições de campo, o tiametoxam não foi detectado em estruturas florais da soja. O seu metabólito, clotianidina, foi consideravelmente detectado, indicando a translocação do pesticida (CAMARGO et al., 2019).

Em abóbora “Cucurbita pepo”, tratada com tiametoxam via água de irrigação por gotejamento, logo após o transplante das mudas, concentrações residuais do inseticida foram detectadas em amostras de flores (STONER; EITZER, 2012).

Blacquière et al. (2012) em uma revisão de literatura sobre neonicotinóides em abelhas traz algumas reflexões muito relevantes. A primeira delas é que, de uma maneira geral, os neonicotinóides são translocados para diferentes partes da planta por meio dos vasos condutores de seiva. Diante disso é esperado encontrar residual do inseticida nas flores.

2.1.3. Risco para polinizadores

Amostras de mel e geleia real analisadas por cromatografia apresentaram dez diferentes inseticidas neonicotinóides, atestando a exposição dos insetos polinizadores a esse grupo de pesticidas (HOU et al., 2019).

Gierer e seus colaboradores (2019) indicam os estudos de pólen e néctar como parte essencial das avaliações de risco dos pesticidas aos polinizadores devido à importância da via de exposição.

Os níveis médios de resíduos já relatados nas matrizes polinizadoras são de 2 $\mu g.kg^{-1}$ no néctar e de 3 $\mu g.kg^{-1}$ no pólen, resíduo inferior dos níveis de toxicidade aguda e crônica. No entanto os dados apresentam pouca confiabilidade, pois as análises foram realizadas por cromatografia a níveis bem próximos do limite de detecção do equipamento. De qualquer forma os níveis de pólen e néctar coletado pelas abelhas também são bem baixos. Os autores encorajam o aumento da produção científica neste contexto (BLACQUIÈRE et al., 2012).

Apesar de essencial, os resíduos encontrados no pólen e néctar das culturas, não definem, isoladamente, o risco para os polinizadores. Gierer et al. (2019) corroboram sobre a complexidade desses estudos, uma vez que os resíduos em matrizes polinizadoras podem ser diretamente influenciados por cultura, método de aplicação, propriedades físico-químicas dos pesticidas e condições ambientais.

Moléculas inseticidas de um mesmo grupo químico podem ter potencial de toxicidade diferente. Estudos com *Apis melifera* e *Bombus terrestris* evidenciaram que a interação molécula inseticida versus inseto polinizador deve ser estudada individualmente (REID et al., 2020; MUSTARD et al., 2020). Isso porque, além da complexidade do comportamento do pesticida nas matrizes polinizadoras, a morfologia, sensibilidade e o comportamento de cada polinizador também deve ser considerado para avaliação do impacto. Estudos nos mostram o leque de particularidades.

Sobre a toxidade do tiametoxam em *Apis melífera,* Friol et al. (2017), em um estudo *in vitro,* avaliaram o efeito de 0.001 $ng.\mu L^{-1}$ do inseticida sobre a sobrevivência larval e pupal e emergência de adultos e os resultados apontaram citotoxidade do tiametoxam podendo comprometer a longevidade das abelhas de toda a colônia. Mustard et al. (2020) evidenciaram o impacto direto do tiametoxam na percepção olfativa de *Apis melifera*, o que pode prejudicar o forrageamento e a habilidade de comunicação com a colônia. Christen e colaboradores (2016) também sugerem

efeitos adversos na atividade de forrageamento e ainda potencial diminuição da formação de memória a longo prazo. Shi et al. (2017) identificaram alterações no metabolismo, biossíntese e translação de abelhas melíferas contaminadas com thiamethoxam.

Quanto às abelhas *Bombus terrestres*, colaboradoras na polinização do tomateiro, Baron et al. (2017) observaram redução de 26% na postura de ovos de abelhas rainhas expostas ao tiametoxam, retardando o início da colônia. No entanto Laycock et al. (2014) não detectaram nenhum efeito em *Bombus terrestris* em níveis tipicamente encontrados nos néctares de safras tratadas (entre 1 e 11 $\mu g.kg^{-1}$), nesse estudo os autores não analisaram o pólen.

Um estudo sobre a dieta das abelhas *Apis mellifera* e *Bombus terrestris* nos revela que esses polinizadores preferem alimento contaminado com neonicotinóides (imidacloprido, tiametoxam e clotianidina), apesar do consumo desses pesticidas reduzir o apetite (KESSLER et al., 2015).

Além da toxidade, o comportamento dos insetos polinizadores pode influenciar diretamente na exposição aos pesticidas e ser determinante para o risco. Rundlöf e colaboradores (2015) propõe que os efeitos relatados em abelhas melíferas por exposição à pesticidas neonicotinóides em estudos de ambiente controlado podem ser diferentes para abelhas silvestres em condições de campo. Os pesquisadores avaliaram o impacto da clotianidina aplicada via tratamento de sementes de colza e concluíram sobre a importância das variáveis. Woodcock et al. (2013) evidenciaram a diferença de contato de diferentes abelhas (*Apis mellifera*, *Bombus terrestris* e abelhas solitárias) com as anteras das plantas de colza e a probabilidade de acumular pólen livre em seus corpos, os autores notaram uma variação de até 50% entre as espécies. Garibaldi et al. (2011) identificaram maior visitação de polinizadores nativos em lavouras próximas de áreas preservadas, e, portanto, maior frutificação, porém tal comportamento não foi observado com abelhas melíferas. Calvo-Agudo et al. (2019) propõem que os excrementos de insetos sugadores podem ser outra via de exposição dos neonicotinóides aos insetos polinizadores, uma vez que os autores detectaram tiametoxam e imidacloprido nos dejetos de insetos da ordem *Hemiptera* que se alimentaram do floema das plantas.

2.2. Tomaticultura e polinizadores

Apesar de apresentar baixa frequência de polinização cruzada, a colaboração de abelhas coletoras de pólen nas lavouras de tomate pode aumentar a produção e qualidade dos frutos. Essa contribuição valiosa é possível pois o formato das flores do tomateiro viabiliza a polinização vibratória, dado quando as abelhas, em especial as nativas, se penduram abaixo de uma flor e vibram seus músculos torácicos, liberando o pólen das anteras para seus próprios corpos e para os estigmas da mesma flor (FRANCESCHINELLI et al., 2013). A Figura 1 ilustra a polinização vibratória em flores de tomate.

Figura 1. Polinização vibratória

Fonte: Twitter @angelantics

Silva-Neto et al. (2017) evidenciaram uma forte interação planta-polinizador nas lavouras de tomate. Os autores observaram 40 espécies diferentes de abelhas visitando os tomateiros, das quais 30 delas com potencial polinizador na cultura. As mais observadas *Exomalopsis analis*, *Augochloropsis* spp, *Paratrigona lineata*, *Pseudaugochlora* spp. e *E. auropilosa*. A disponibilidade e esgotamento do pólen das flores coincidiu com a visitação dos insetos colaboradores, comprovando a eficiência das abelhas na remoção de grãos de pólen das anteras de tomate.

O estudo do forrageamento de espécies de *Bombus spp* em tomateiros alocados em casa-de-vegetação, indicou grande cooperação dos polinizadores na produção de tomates (TORRES-RUIZ; JONES, 2012; SALVARREY et al., 2020).

Conscientes da presença e contribuição favorável dos polinizadores em tomate, a segurança dos insetos em meio a um intenso uso de pesticidas nas lavouras deve ser zelada. Santos e Nascimento (2012) avaliaram a diversidade dos polinizadores em sistema orgânico e convencional de produção. O número de insetos polinizadores

em lavouras orgânicas foi 76% maior quando comparada ao convencional, indicando o impacto dos pesticidas na diversidade entomofauna.

Sechser e Freuler (2003) apresentaram uma estratégia de coexistência entre tiametoxam e polinizadores no ciclo do tomateiro ao indicar o uso do químico via água de irrigação em sistema hidropônico. Os autores evidenciaram baixo risco para os insetos polinizadores *Bombus terrestris* L. nessa modalidade de uso.

Para corroborar o baixo impacto no uso do tiametoxam via água de irrigação, Alarcón e seus colaboradores (2005) aplicaram dose única e parcelada, de 200 g do inseticida por hectare de tomates cultivados em casa de vegetação, no sul da Espanha, em diferentes modalidades. Os resultados mostraram que as plantas que receberam aplicação via água de irrigação não apresentaram efeito negativo sobre a polinização, enquanto a aplicação foliar reduziu a zero a polinização por duas semanas após a pulverização.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Solo

Para cultivo das plantas, amostras de solo foram coletadas da camada superficial (0-20 cm) de uma área experimental pertencente a Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo localizada no município de Piracicaba-SP, Brasil. (47°37’2.554’’ W e 22°43’3.436’’ S). O montante coletado foi peneirado e exposto ao ar para secar. Uma fração foi enviada para o laboratório de análises físico-químicas, suas características estão detalhadas na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades físico-químicas do solo. Piracicaba, São Paulo, Brasil, 2020

Propriedades	**Atributos do solo**
Classe textural	Médio-argiloso
Areia ($g.kg^{-1}$)	691
Silte ($g.kg^{-1}$)	48
Argila ($g.kg^{-1}$)	261
pH $CaCl_2$	5,3
MO ($g.dm^{-3}$)	67
P ($mg.dm^{-3}$)	77
K ($mmolc.dm^{-3}$)	10.6
Ca ($mmolc.dm^{-3}$)	41
Mg ($mmolc.dm^{-3}$)	20
H+Al ($mmolc.dm^{-3}$)	28
SB ($mmolc.dm^{-3}$)	71,6
CTC ($mmolc.dm^{-3}$)	99,6
V (%)	72 %

O solo foi fracionado para compor 75 vasos plásticos com prato individual. Cada vaso recebeu 750 g de solo e foi umedecido previamente ao plantio das mudas.

3.2. Plantas de tomate

Para compor o experimento, 75 mudas de tomate-cereja foram adquiridas de um viveiro de mudas de Piracicaba-SP e transplantadas nos vasos.

As plantas de tomate foram cultivadas em uma câmara de crescimento de plantas localizada no Laboratório de Ecotoxicologia, CENA/USP, Piracicaba, SP.

Durante todo o período experimental, de aproximadamente 60 dias, as plantas foram submetidas a um fotoperíodo de 12h, intensidade luminosa de 300-325 mol s^{-1} m^{-2}, temperatura de 18 a 21 °C e umidade relativa de 70%.

Considerando a alta solubilidade do produto em água, toda irrigação fornecida às plantas foi feita por capilaridade, visando eliminar a lixiviação como potencial variável. Cada planta recebeu em média 150 ml de água em dias alternados, disponibilizada individualmente em seu respectivo prato.

Para atender a alta exigência nutricional do tomateiro, as plantas foram fertirrigadas semanalmente. A solução nutritiva utilizada na fertirrigação foi discriminada na Tabela 2.

Tabela 2. Solução nutritiva da fertirrigação

Componente	KNO_3	$CaNO_3$	KH_2PO_4	K_2SO_4	$MgSO_4$	Conmicros®
Quantidade (mg/L)	230	800	260	229	400	30

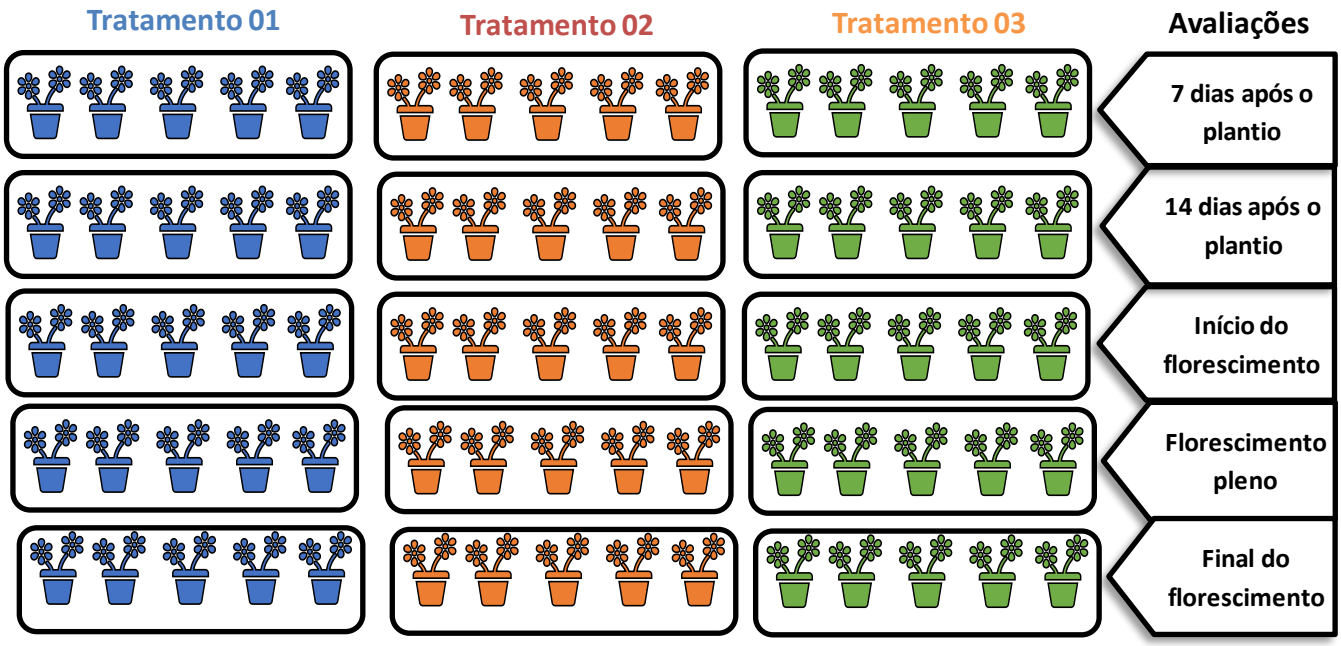
Fonte: Prof. Dra. Simone da Costa Mello

As plantas não foram podadas ao longo ao experimento, toda folha ou flor senescente foram acondicionadas em sacos de papel, desidratadas em estufas de secagem a 40°C e armazenadas para compor a posterior análise.

3.3. Delineamento experimental

O delineamento utilizado foi inteiramente casualizado com três tratamentos e cinco repetições, sendo cada repetição representada por uma planta de tomate. As avaliações do experimento foram realizadas ao longo do ciclo da cultura, com ênfase no florescimento do tomateiro, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2. Diagrama experimental



3.3.1. Tratamentos

Os tratamentos inseticidas, com as devidas especificações, estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Tratamentos inseticidas

Trat.	Dose						Vol. de calda	N° da aplicação	Época de aplicação
	Produto comercial Durivo®				Produto radiomarcado oxadiazinyl-4-14C				
	mL. ha^{-1}	g tiametoxam. ha^{-1}	µL. planta^{-1}	mg tiametoxam. planta^{-1}	DPM. planta^{-1}	Becquerel. planta^{-1}	mL. planta^{-1}		
1	800	160	72	14.4	400.000	6 667	30	1	Logo após o plantio
2	400	80	36	7.2	200.000	3.333	30	1	Logo após o plantio
	400	80	36	7.2	200.000	3.333	30	2	14 dias após o plantio
3	267	53.4	24	4.8	133.000	2.217	30	1	Logo após o plantio
	267	53.4	24	4.8	133.000	2.217	30	2	14 dias após o plantio
	267	53.4	24	4.8	133.000	2.217	30	3	28 dias após o plantio

A solução de trabalho foi preparada por meio da diluição da molécula comercial com a molécula radioativa, uma vez que o tiametoxam radiomarcado possui massa

desprezível em relação a dose de campo recomendada, necessitando então de um veículo.

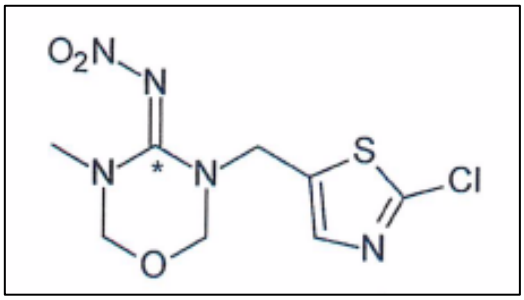
Ao longo do ciclo do tomateiro os três tratamentos propostos receberam a dose comercial máxima de Durivo® (800 mL.ha^{-1}), recomendada pelo fabricante. A principal variável desse estudo foi a época de aplicação, visando avaliar o comportamento dos resíduos do inseticida em cada fase de desenvolvimento da cultura. Portanto o número de cada tratamento é equivalente à quantidade de aplicações, com dose fracionada.

Como a bula do Durivo® indica a dosagem do produto comercial por hectare de lavoura, foi necessário calcular a dose recomendada para cada planta, a fim de viabilizar a aplicação por vaso. Para tanto utilizou-se a densidade média de plantas de tomate nos campos de produção comercial (11.111 plantas.ha^{-1}), conforme exemplo a seguir.

$$\mathbf{800}\ \boldsymbol{ml} \rightarrow \mathbf{11.111}\ \boldsymbol{plantas}$$
$$\underbrace{\mathbf{0.072}\ \boldsymbol{ml}}_{\mathbf{72}\ \boldsymbol{\mu l}} \rightarrow \mathbf{1}\ \boldsymbol{planta}$$

A molécula de tiametoxam radioativo, oxadiazinyl-4-^{14}C, com atividade específica de 5,15 MBq.mL^{-1} e pureza radioquímica de 98,6 %, utilizada nesse tratamento, foi gentilmente fornecida pela Syngenta Proteção de Cultivos Ltda. A Figura 3 ilustra a estrutura química da molécula e os locais onde se encontram o ^{14}C.

Figura 3. Molécula do inseticida ^{14}C-tiametoxam



* Representa o local onde se encontram os ^{14}C na molécula.

O tiametoxam radioativo foi diluído em metanol e logo em seguida determinada a radioatividade da solução. Alíquotas de 1 µl, em triplicata, foram pipetadas em frascos contendo solução cintiladora e levadas para o cintilador líquido. A média da

radioatividade obtida foi utilizada para determinar a quantidade de solução a ser adicionada em cada tratamento, conforme a seguir.

$$\mathbf{1}\ \boldsymbol{\mu l} \rightarrow \mathbf{87.723}\ \boldsymbol{DPM} \quad \text{(solução)}$$
$$\mathbf{4.56}\ \boldsymbol{\mu l} \rightarrow \mathbf{400.000}\ \boldsymbol{DPM} \quad \text{(vaso)}$$

Para cada aplicação, de cada tratamento, uma calda foi preparada contendo o produto comercial Durivo® e o produto radiomarcado tiametoxam (oxadiazinyl-4-^{14}C) nas dosagens indicadas na Tabela 3, diluídas em água. O volume preparado foi dimensionado para atender todos os vasos que compunham o tratamento.

Alíquotas em triplicata de 100 µl de cada calda preparada foram adicionadas no cintilador líquido para leitura da radioatividade, previamente a aplicação, para quantificar o total inicial aplicado, para fins de cálculos posteriores.

Após preparo e aferição da calda, cada vaso recebeu 30 ml de solução. A aplicação foi realizada com auxílio de uma proveta graduada de 50 ml, em simulação a um *drench*, esguicho no solo próximo a base de cada planta. O volume de calda foi vertido na base do caule de cada planta, individualmente. A solução, em sua maioria, escorreu e foi absorvida pelo solo.

3.3.2. Avaliações

Em cada período de avaliação as plantas foram retiradas de seu respectivo vaso e as suas raízes foram lavadas, individualmente, com água deionizada sobre um recipiente plástico identificado para remoção de todo o solo aderido.

Os recipientes contendo o solo e a água de lavagem foram mantidos em repouso por cerca de 24h para a decantação das partículas sólidas. Considerando a alta solubilidade do tiametoxam em água, alíquotas em duplicata, da fase líquida dos recipientes, foram pipetadas e adicionadas em solução cintiladora para leitura da radioatividade no espectrômetro de cintilação líquida.

As plantas foram dispostas em folhas de papel sulfite identificadas, separadas, organizadas em uma prensa e levadas para estufa de secagem por 3 horas a 40°C para obtenção das exsicatas.

Para avaliação qualitativa da absorção e translocação, as exsicatas foram submetidas à um radio scanner (Packard-Cyclone) para obtenção das radioimagens.

Para avaliação quantitativa as exsicatas retornaram à estufa a 40°C até a eliminação de toda água presente nas plantas. Após a completa secagem, as plantas foram subdivididas em raiz, caule, folhas, flores e anteras. Os frutos, em particular, foram removidos das plantas antes da constituição das exsicatas, separados em recipientes identificados e submetidos a liofilização para sublimação de todo líquido presente. As amostras foram divididas em frações de até 200 mg para cada recipiente de incineração. Os recipientes foram individualmente submetidos à combustão em um oxidador biológico (OX 600 Harvey Instruments), para oxidação do material vegetal na presença de oxigênio. O gás carbônico radiomarcado ($^{14}CO_2$) resultante foi capturado em solução cintiladora contida nos frascos de cintilação. Os frascos foram levados ao espectrômetro de cintilação líquida para leitura da radioatividade.

A absorção do inseticida foi determinada por meio da porcentagem da radioatividade presente no interior da planta, obtida através da soma de todas as frações em relação ao total aplicado na planta.

O tiametoxam acumulado em cada fração da planta foi determinado em porcentagem, sendo a porcentagem retida na fração em relação do total absorvido pela planta, para melhor compreensão da sistemicidade da molécula na cultura.

O residual de tiametoxam, expresso em µg tiametoxam por quilograma de material vegetal, foi calculado para cada planta e suas frações por apresentar equivalência aos parâmetros de toxicidade da molécula estabelecida pelos órgãos reguladores.

3.3.3. Análise estatística

Foram realizadas análises de variância (ANOVA) e aplicação do teste F aos dados referentes à absorção, tiametoxam acumulado, bem como o residual do inseticida presente no tomateiro. Os valores percentuais e o residual da molécula em cada planta e/ou fração, de cada período de avaliação, foram comparadas pelo Teste de Scott Knott ($p<0,05$).

Para visualizar o comportamento da molécula inseticida ao longo do ciclo do tomateiro e o comparativo entre os diferentes tratamentos, os dados foram plotados a partir do Sigma Plot (Versão 14.0 para Windows, Systat Software Inc., Point Richmond, CA, EUA) para obtenção das curvas construídas com dados dos cinco pontos de avaliação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 4 foram dispostas exsicatas referentes à cada período de avaliação para melhor compreensão do desenvolvimento do tomateiro durante todo o experimento.

Figura 4. Exsicatas das plantas de tomate-cereja referentes à cada avaliação

1ª avaliação
7 dias após plantio

2ª avaliação
14 dias após plantio

3ª avaliação
24 dias após plantio
Início do florescimento

4ª avaliação
42 dias após plantio
Florescimento pleno

5ª avaliação
62 dias após plantio
Final do florescimento

4.1. Avaliações qualitativas

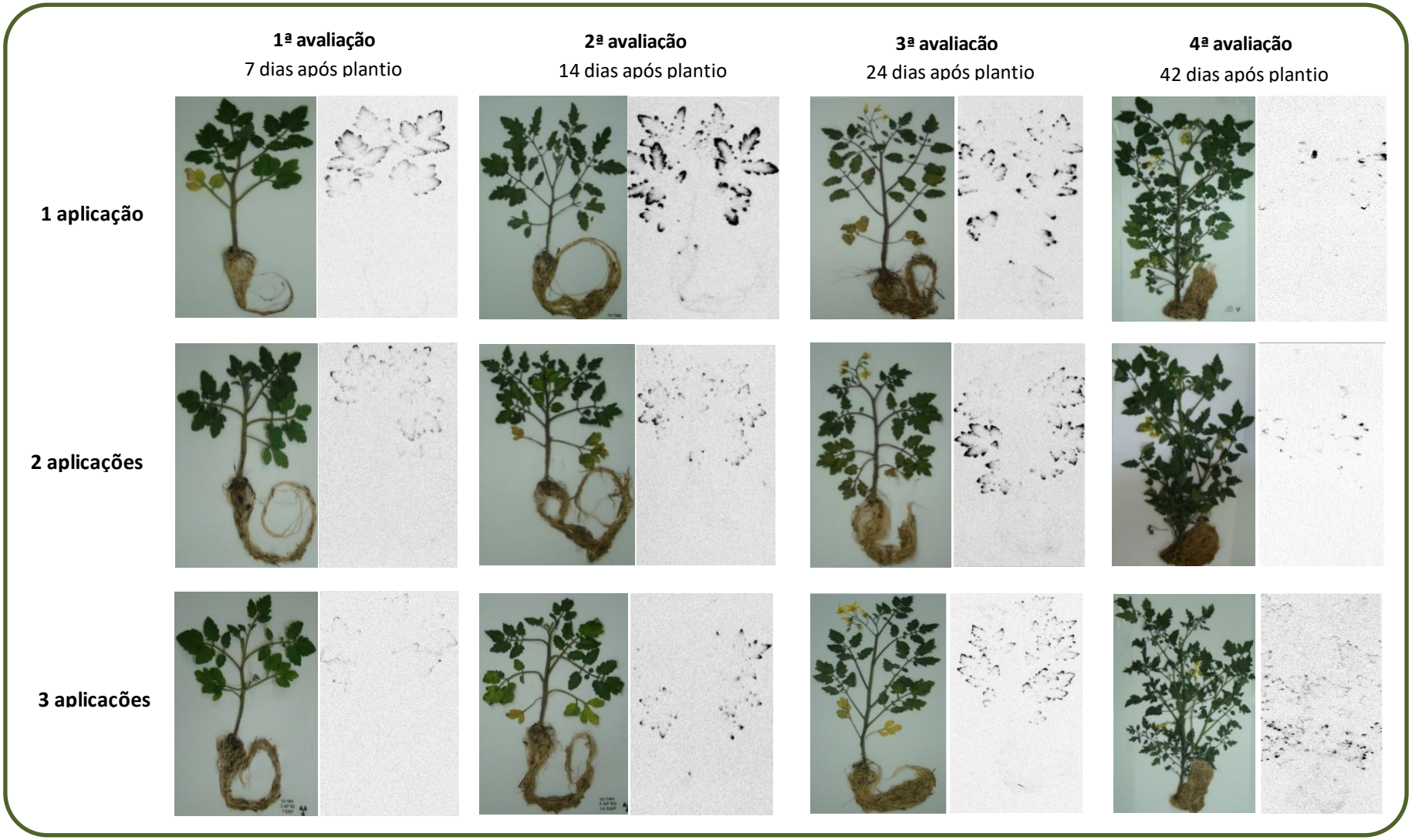
As avaliações qualitativas, representadas pelas radioimagens, foram realizadas até os 42 dias após o transplantio das mudas, devido ao tamanho das plantas, limitantes para o equipamento. As autorradiografias, ilustradas pela Figura 5, evidenciam a alta sistemicidade do tiametoxam nas plantas de tomate.

Ao longo das avaliações nota-se um acúmulo de radioatividade na extremidade das folhas e uma singela presença nas raízes, no caule e nas flores, indicando movimentação do tiametoxam pelo xilema e floema. Isso porque a modalidade de aplicação utilizada no experimento viabilizou a absorção da molécula inseticida somente pela base do caule, no momento da aplicação, e pelas raízes, por meio da solução absorvida pelo solo.

De uma maneira geral, até os 42 dias após aplicação, os solos funcionaram como um reservatório de tiametoxam. À medida que a planta cresceu e emitiu folhas novas, a molécula foi continuamente translocada, visto que em todas as avaliações de imagem, de todos os tratamentos, observou-se a presença de radioatividade.

Considerando que regiões mais escuras das radioimagens representam áreas de maior radioatividade, observou-se que quanto mais distante da aplicação, em dias, menor é a translocação do inseticida. As imagens nos mostram que em até 14 dias após a aplicação a planta ainda está absorvendo grandes quantidades de tiametoxam, porém ao longo do tempo a translocação vai perdendo força. Apesar de enfraquecer, o movimento da molécula na planta não cessa até os 42 dias após aplicação.

Figura 5. Fotografias das exsicatas das plantas de tomate-cereja à esquerda e sua respectiva radioimagem à direita em cada avaliação



4.2. Avaliações quantitativas

As avaliações quantitativas, seguiram até os 62 dias após o transplantio das mudas. Os dados referentes a porcentagem de absorção em relação a radioatividade inicial aplicada, de tiametoxam pelo tomateiro, porcentagem da molécula acumulada nas frações da planta, e o residual presente em cada fração encontram-se discriminados na Tabela 4, com as respectivas comparações de médias.

Tabela 4. Parâmetros quantitativos para determinação do movimento e retenção do tiametoxam nas plantas de tomate-cereja

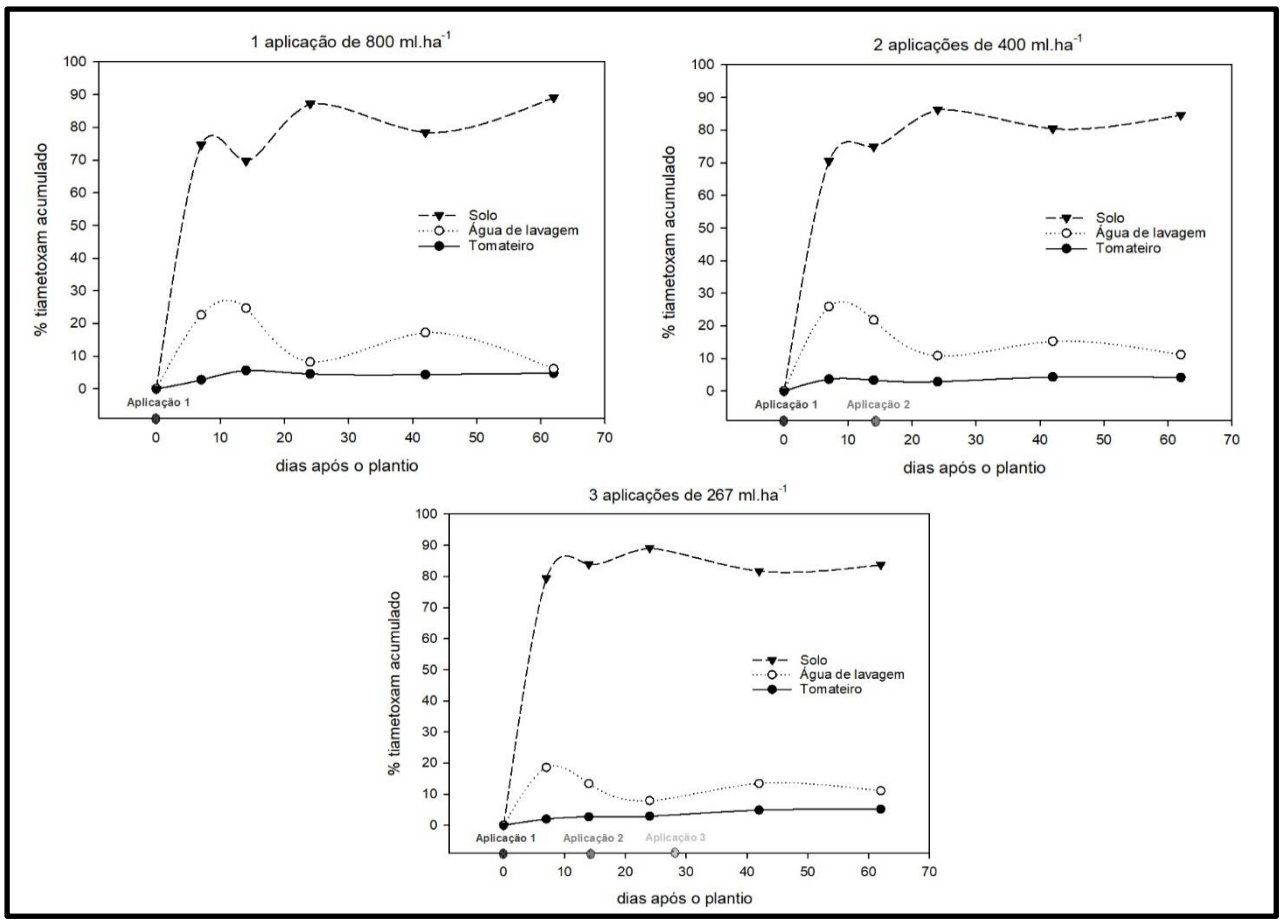
Parâmetro	Fração	Avaliação														
		(1ª) 7 dias após o plantio			*(2ª) 14 dias após o plantio*			*(3ª) Início do florescimento*			*(4ª) Florescimento pleno*			*(5ª) Final do florescimento*		
		*1 AP**	*2 AP**	*3 AP**	*1 AP**	*2 AP**	*3 AP**	*1 AP**	*2 AP**	*3 AP**	*1 AP**	*2 AP**	*3 AP**	*1 AP**	*2 AP**	*3 AP**
% de tiametoxam absorvido	*Planta inteira*	2,78 **a**	3,64 **a**	1,99 **a**	5,64 **a**	3,34 **a**	2,71 **a**	4,57 **a**	2,90 **b**	2,92 **b**	4,38 **a**	4,32 **a**	4,87 **a**	4,83 **a**	4,18 **a**	5,18 **a**
% de tiametoxam acumulado	*Raíz*	4,07 **a**	4,97 **a**	7,82 **a**	11,64 **a**	9,22 **a**	6,83 **a**	7,44 **a**	5,26 **a**	7,48 a	14,17 **a**	9,62 **a**	14,63 **a**	11,25 **a**	12,36 **a**	8,31 **a**
	Caule	1,36 **a**	1,11 **a**	1,47 **a**	2,04 **a**	3,57 **a**	2,04 **a**	3,34 **a**	1,87 **a**	1,72 **a**	2,77 **a**	3,82 **a**	2,97 **a**	14,31 **a**	8,17 **a**	7,34 **a**
	Folhas	91,08 **a**	93,93 **a**	90,71 **a**	87,80 **a**	86,65 **a**	81,76 **a**	86,76 **a**	92,34 **a**	89,81 **a**	83,18 **a**	79,91 **a**	81,41 **a**	76,74 **a**	77,34 **a**	83,68 **a**
	Flores	**			**			0,71 **a**	0,53 **a**	1,23 **a**	0,40 **a**	1,04 **a**	1,11 **a**	0,60 **a**	1,06 **a**	0,64 **a**
	Anteras	**			**			0,12 **a**	0,05 **a**	0,03 **a**	0,09 **a**	0,08 **a**	0,12 **a**	0,10 **a**	0,03 **a**	0,09 **a**
	Frutos	**			**			**			**			0,74 **a**	2,01 **a**	0,82 **a**
µg de tiametoxam por kg de cada fração (ppb)	*Planta inteira*	152,80 **a**	53,47 **b**	28,49 **b**	100,17 **a**	31,59 **b**	18,23 **b**	43,20 **a**	34,32 **a**	27,92 **a**	12,95 **a**	12,01 **a**	21,57 **a**	4,85 **a**	4,45 **a**	7,42 **a**
	Raíz	29,60 **a**	5,86 **b**	6,44 **b**	36,16 **a**	17,20 **a**	8,24 **a**	8,55 **a**	6,59 **a**	6,44 **a**	5,22 **b**	3,24 **b**	7,54 **a**	2,48 **b**	2,01 **b**	3,84 **a**
	Caule	12,83 **a**	5,69 **b**	3,26 **b**	14,46 **a**	8,27 **a**	2,41 **b**	4,27 **a**	2,01 **a**	2,46 **a**	1,25 **a**	2,46 **a**	2,51 **a**	2,26 **a**	1,62 **a**	1,90 **a**
	Folhas	360,36 **a**	159,56 **b**	66,41 **b**	221,69 **a**	67,45 **b**	34,27 **b**	122,62 **a**	84,00 **a**	53,53 **a**	27,94 **a**	24,85 **a**	39,43 **a**	36,48 **a**	8,71 **a**	14,73 **a**
	Flores	**			**			15,28 **a**	9,77 **a**	14,32 **a**	2,46 **a**	7,66 **a**	9,56 **a**	3,26 **a**	5,60 **a**	5,86 **a**
	Anteras	**			**			6,58 **a**	5,43 **a**	2,66 **a**	1,25 **a**	2,39 **a**	2,29 **a**	0,70 **a**	2,24 **a**	2,96 **a**
	Frutos	**			**			**			**			1,48 **a**	0,64 **a**	0,45 **a**

* AP: aplicação
**Indisponibilidade das frações nas plantas experimentais no momento da avaliação,
As médias de cada fração seguidas pela mesma letra, no mesmo período de avaliação, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância.

O complexo de dados, proveniente da quantificação da radioatividade, dispostos na Tabela 4 foram plotados em gráficos para facilitar a compreensão do comportamento do inseticida nas plantas de tomate-cereja.

Na Figura 6 podemos visualizar dinâmica do tiametoxam no sistema solo-planta. A radioatividade determinada nas plantas e na água de lavagem, durante as avaliações, nos permitiu, por exclusão, determinar o acúmulo de inseticida nos solos, visto que a aplicação via *drench* não teve potenciais derivas e foi em sua maioria absorvida pelos solos.

Figura 6. Dinâmica do tiametoxam no sistema solo-planta



Ao observar os gráficos nota-se muita semelhança entre os tratamentos. A porcentagem de absorção média de tiametoxam pelo tomateiro, de uma maneira geral, variou de 1,99% a 5,64% ao longo dos dois meses de ciclo. As médias foram significativamente diferentes somente aos 24 dias após o plantio, no início do florescimento da cultura, quando o tratamento que recebeu aplicação única apresentou absorção média de 4,57% enquanto os demais apresentaram

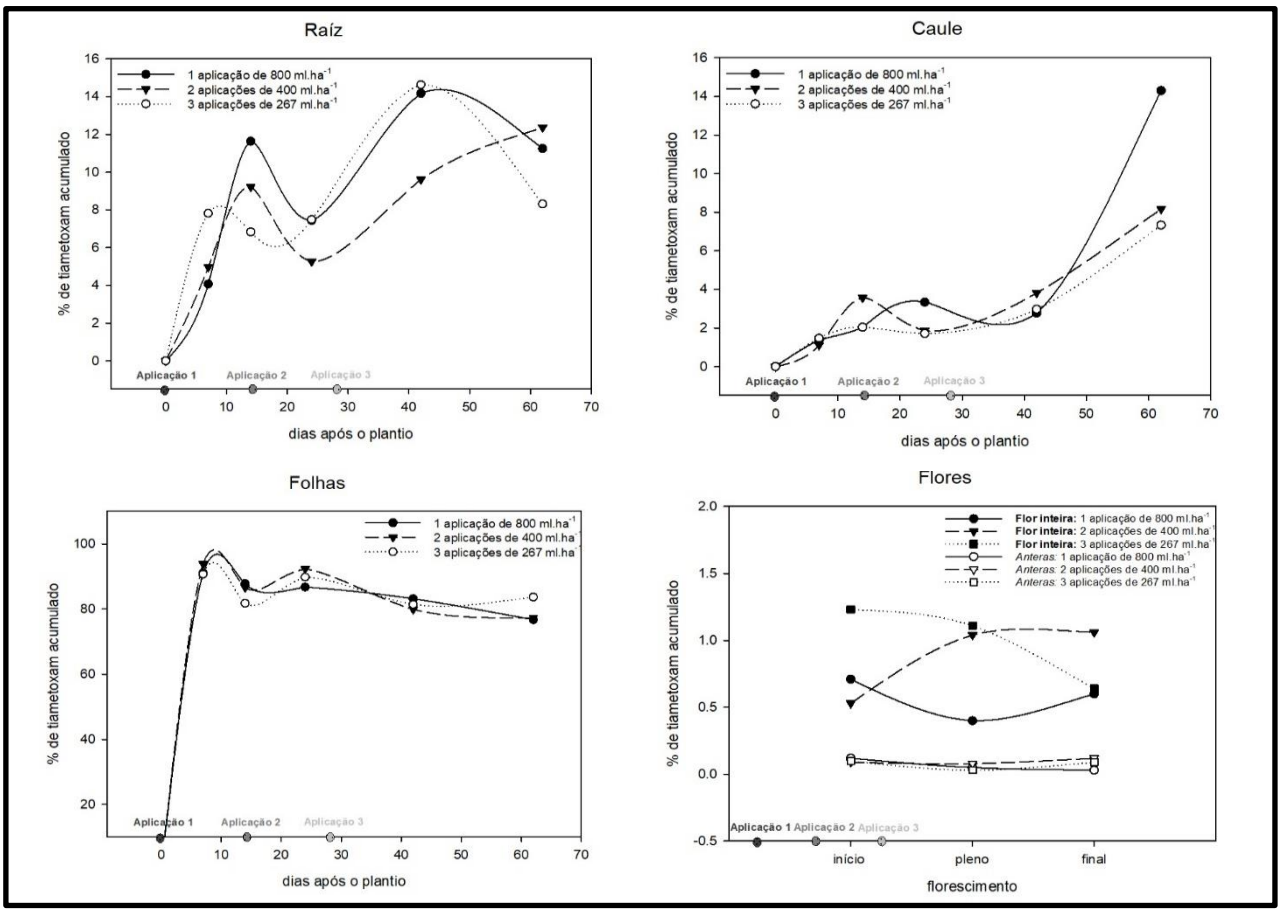
2,90 e 2,92%. A partir dos 42 dias após o plantio, momento em que todas as aplicações de todos os tratamentos já haviam ocorrido, a variação entre as médias dos tratamentos diminuiu, oscilando entre 0,55% e 1% até o final experimental.

Considerando a alta solubilidade do tiametoxam (MACBEAN, 2010), a água de lavagem apresentou níveis relevantes de radioatividade em solução, com valores médios variando de 20% aos 7 dias após o plantio e 10% aos 62 dias após o plantio. Não foram observadas diferenças entre os tratamentos tão pouco influência das aplicações na curva.

Os solos se comportaram como um depósito da molécula, com retenção de cerca de 70 a 90% ao longo dos dois meses de ciclo do tomateiro. Com degradação lenta, as avaliações do experimento seguiram até os 62 dias após o plantio, período antecedente à meia vida esperada para o tiametoxam, de 65 a 170 dias (LI et al., 2018).

Na Figura 7 as porcentagens médias de tiametoxam acumulado em cada segmento da planta foram dispostas graficamente.

Figura 7. Porcentagens de tiametoxam acumulado na raiz, caule, folhas e flores de tomate-cereja



No teste de comparação de médias nenhuma diferença significativa foi constatada entre os tratamentos. O acúmulo de mais de 80% do inseticida nas folhas indica a alta translocação da molécula, logo evidenciado pelas radioimagens.

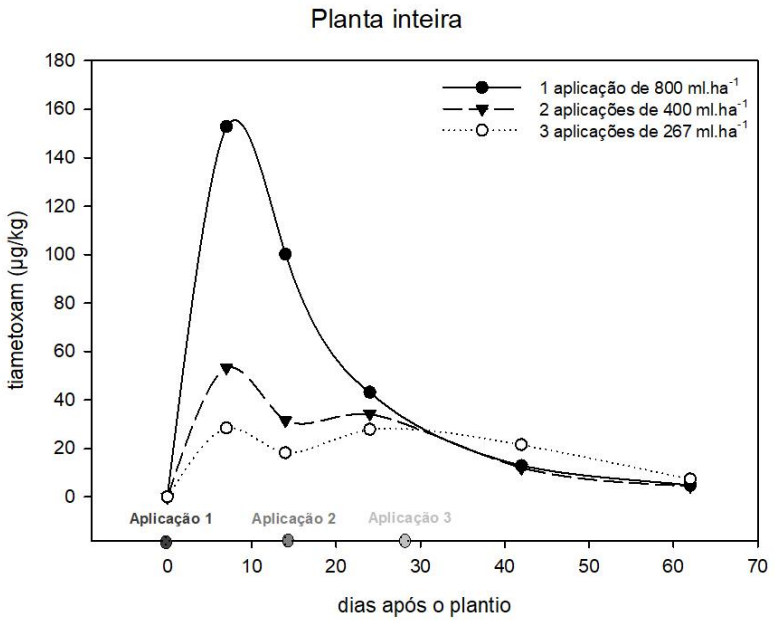
Apesar da baixa expressão do tiametoxam no caule, as porcentagens médias acumuladas apresentaram níveis superiores na última avaliação. Até os 42 dias após o plantio o acúmulo médio ficou entre 1,11% a 3,82% subindo para 7,34% a 14,31% aos 62 dias após o plantio.

Nas raízes o tiametoxam acumulado apresentou oscilações ao longo das avaliações, com menor expressão aos 7 dias após o plantio, 4,07%, e maior aos 42 dias após o plantio, 14,63%.

As flores inteiras apresentaram retenção máxima de 1,23% do total absorvido pela planta, enquanto as anteras apresentaram somente 0,12% de tiametoxam. Ao analisar os dados, observamos pequenas oscilações entre as médias das flores e anteras, porém sem proporcionalidade entre elas. Por exemplo, no início de florescimento as flores do tratamento com aplicação única apresentaram 0,71% e as anteras 0,12% de tiametoxam, enquanto as flores do tratamento com aplicação em triplicata apresentaram 1,23% e as anteras 0,03% do inseticida. O mesmo comportamento se observa no florescimento pleno e final de florescimento. Outro fator observado foi a época de aplicação e dose no momento da avaliação, e novamente nenhuma diferença relevante, portanto nenhum padrão a ser considerado.

O residual de tiametoxam retido nas plantas de tomate, expresso em µg da molécula por kg de material vegetal, foi ilustrado graficamente na Figura 8. Os residuais de cada segmento das plantas, por sua vez, foram plotados na Figura 9. As figuras foram construídas como facilitadoras para compreensão do comportamento da molécula com relação ao desenvolvimento das plantas.

Figura 8. Residual de tiametoxam (µg.kg^{-1}) presente nas plantas de tomate-cereja



O gráfico nos mostra que os maiores níveis residuais foram observados logo nas primeiras avaliações, de tal maneira que o tratamento com dose única diferiu significativamente dos tratamentos com dose parcelada, nas avaliações aos 7 e 14 dias após o plantio.

O tratamento que recebeu dose única apresentou o maior nível residual, 152,80 µg.kg^{-1}, aos 7 dias após o plantio, com queda contínua nos dois meses de experimento, chegando a somente 4,85 µg.kg^{-1} na última avaliação.

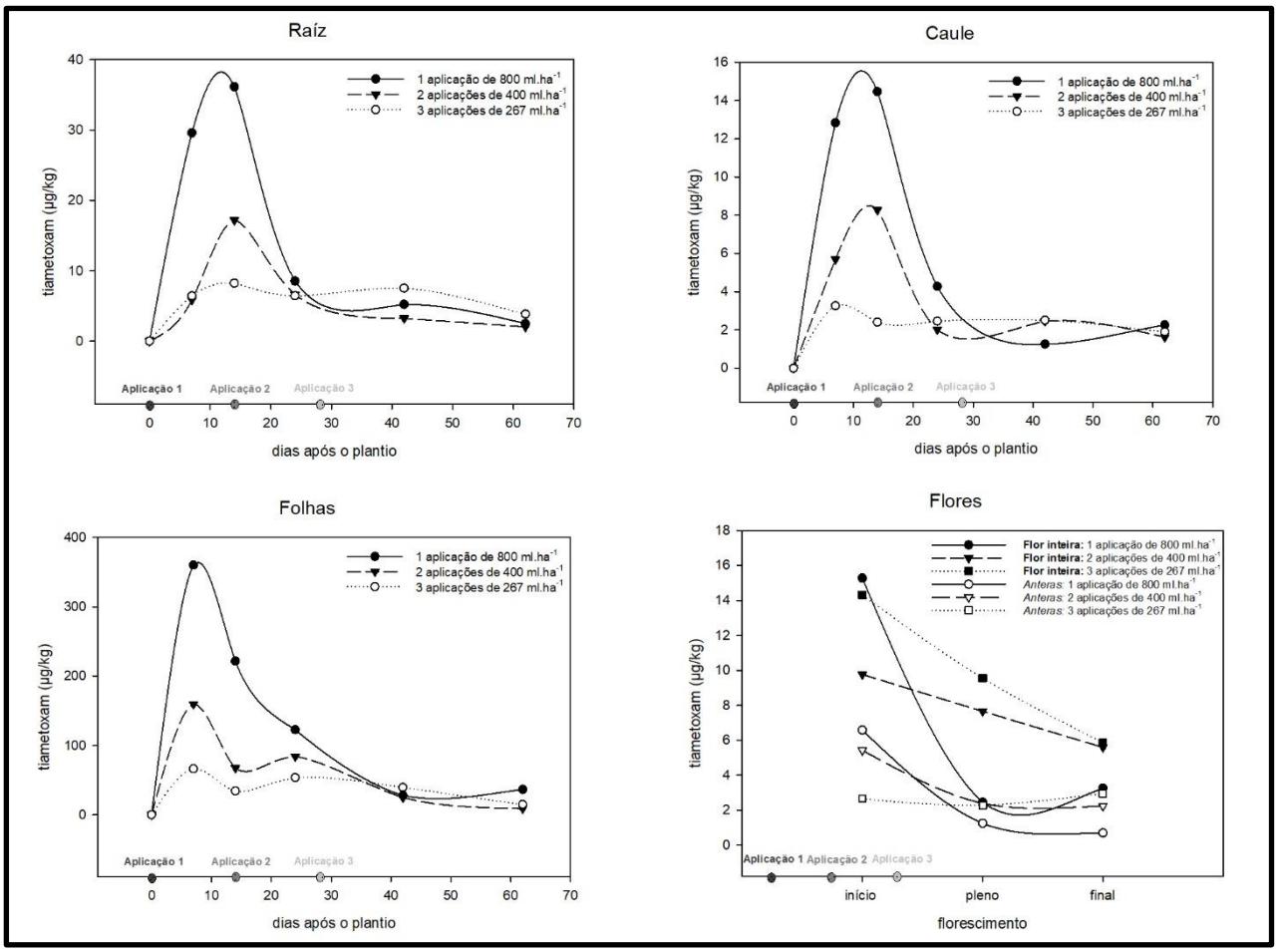
O tratamento com aplicação em duplicata apresentou o maior residual de 53,47 µg.kg^{-1}, enquanto o tratamento em triplicata 28,49 µg.kg^{-1}, ambos aos 7 dias após o plantio, reduzindo a 4,45 µg.kg^{-1} e 7,52 µg.kg^{-1}, respectivamente, aos 62 dias após o plantio.

Os residuais foram diretamente proporcionais à dose de aplicação, dado que as plantas que receberam doses maiores, no início do ciclo, apresentaram picos maiores e, portanto, quanto maior o parcelamento da dose mais achatada a curva residual do inseticida nas plantas.

Os tratamentos que receberam dose parcelada apresentaram níveis residuais menores no início do ciclo e, coerentemente, um pequeno aumento nas avaliações subsequentes à aplicação, posto que a quantidade de picos de cada curva foi proporcional a quantidade de aplicações do tratamento.

A partir dos 42 dias após aplicação, as curvas praticamente se encontraram, em declínio.

Figura 9. Residual de tiametoxam (µg.kg^{-1}) presente na raíz, caule, folhas, flores e anteras de tomate-cereja



As folhas apresentaram um comportamento muito semelhante à planta inteira, com diferenças estatísticas equivalentes. Compreensível, uma vez que mais de 80% do tiametoxam ficaram alocados nas folhas. O maior residual foi de 360,36 µg.kg^{-1}, no tratamento que recebeu dose única, logo aos 7 dias após aplicação. Ao final do experimento o mesmo tratamento apresentou residual de 36,48 µg.kg^{-1}, redução de praticamente 90% dos resíduos nas folhas.

O caule e as raízes apresentaram desempenho correlato à planta inteira, porém sem aumento pronunciado subsequente à cada aplicação parcelada e com níveis residuais bem inferiores. Os maiores valores residuais nas raízes foram de 36,16 µg.kg^{-1} e no caule de 14,46 µg.kg^{-1}, ambos aos 14 dias após o plantio, no tratamento que recebeu aplicação única. Ao final do experimento os residuais dos tratamentos ficaram muito próximos.

Nas raízes, o tratamento que recebeu aplicação única diferiu significativamente dos tratamentos com aplicações parceladas, com residual superior, nos 7 dias após o plantio. As médias de todos os tratamentos foram equivalentes aos 14 e 24 dias após o plantio. Nas últimas avaliações, por sua vez, o residual médio do tratamento com aplicações em triplicata foi superior aos demais, provavelmente devido à época de aplicação.

No caule, os tratamentos diferiram somente aos 7 e 14 dias após o plantio. Na primeira avaliação o tratamento com aplicação única apresentou residual superior aos demais e, na segunda avaliação, o tratamento com aplicação em triplicata diferiu dos demais, com residual inferior.

Os residuais médios presentes nas flores e anteras dos três tratamentos foram estatisticamente similares. No entanto, o gráfico nos mostra a influência da época de aplicação nos resíduos das flores e das anteras.

Analisando as flores, o tratamento com dose única no plantio apresentou residual superior no início de florescimento (15,28 $\mu g.kg^{-1}$), porém, residual inferior aos demais a partir do florescimento pleno (2,46 e 3,26 $\mu g.kg^{-1}$). Já o tratamento que recebeu dose em triplicata, com última aplicação aos 28 dias após o plantio, apresentou residual de tiametoxam superior aos outros tratamentos no florescimento pleno (9,56) e final de florescimento (5,86 $\mu g.kg^{-1}$).

As anteras, por sua vez, apresentaram a mesma tendência que as flores inteiras, porém a níveis inferiores. O maior residual foi registrado no tratamento que recebeu aplicação única, de 6,58 $\mu g.kg^{-1}$ no início de florescimento, enquanto o menor 0,70 $\mu g.kg^{-1}$ foi identificado no mesmo tratamento, no final de florescimento.

As anteras foram analisadas separadamente pois abrigam o pólen, partículas que se aderem ao corpo das abelhas durante a visitação das flores. A contaminação dessa estrutura pode ser um termômetro para avaliar o impacto para os polinizadores presentes nas lavouras.

A faixa residual de tiametoxam detectado nas anteras, de 0,70 a 6,58 $\mu g.kg^{-1}$, pode ser garantida uma vez que a confiabilidade das análises do tiametoxam por radioisótopos é muito superior a cromatografia, dado que essa faixa residual fica bem próxima do limite de detecção do cromatógrafo. (BLACQUIÈRE et al., 2012)

Considerando a colaboração de *Bombus terrestres* na polinização do tomateiro, a literatura nos traz alguns estudos sobre o efeito do pesticida nesses insetos. Baron e seus colaboradores (2017) observaram um impacto na colmeia, com redução de

26% na postura de ovos de abelhas rainhas alimentadas com 2,4 µg.kg^{-1} de tiametoxam, retardando assim o início da colônia.

Por outro lado, Laycock et al. (2014) não detectaram nenhum efeito em *Bombus terrestris* em níveis tipicamente encontrados somente nos néctares de safras tratadas (entre 1 e 11 µg.kg^{-1}), no entanto o pólen não foi considerado nesse estudo.

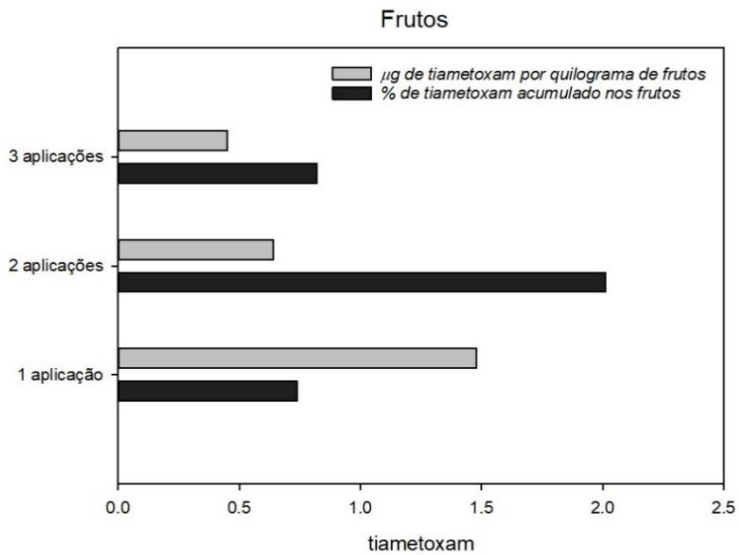
Ambos os estudos forneceram o alimento contaminado diretamente para a colmeia. No entanto dados sobre o quanto da antera contaminada chega de fato na colônia e impacta a população dos insetos polinizadores são fundamentais.

Em estudos de campo, Sechser e Freuler (2003) e Alarcón et al. (2005), compararam a aplicação de 160 a 200 g.ha^{-1} de tiametoxam, em dose única, via foliar e via irrigação por gotejamento em tomates cultivados em casa de vegetação. Ambos os autores notaram diferença na mortalidade de abelhas, reduzindo a zero para uso do inseticida via água de irrigação.

Os autores utilizaram dose equivalente a este estudo, porém avaliaram somente mortalidade dos insetos. Na aplicação foliar temos potencial contaminação por contato indireto do inseticida com as abelhas no momento da pulverização e por residual nas matrizes polinizadoras, já a aplicação via solo ou via irrigação por gotejamento só conta com o residual nas matrizes polinizadoras, quando o inseticida é altamente sistêmico, como é o caso do tiametoxam. Para entender o quanto, de fato, esse residual impacta a população de polinizadores faz-se necessário uma avaliação conjunta com outras variáveis.

A Figura 10 apresenta a % de tiametoxam acumulado nos frutos e o residual presente em µg.kg^{-1} para fins comparativos, aos dois meses após o plantio.

Figura 10. Tiametoxam presente nos frutos de tomate-cereja aos 62 dias após o plantio



Não foram constatadas diferenças significativas entre os tratamentos, quanto ao tiametoxam presente nos frutos de tomate-cereja.

Do total absorvido pela planta, o máximo acumulado nos frutos foi de 2,01% no tratamento que recebeu aplicação em duplicata.

O residual, por sua vez, apresentou um decréscimo quanto à quantidade de aplicações. O tratamento que recebeu uma aplicação via solo, com carência de 62 dias, apresentou o maior nível de resíduo (1,48 $\mu g.kg^{-1}$) à medida que o tratamento que apresentou três aplicações via solo, com carência de 14 dias, apontou o menor nível de resíduo (0,45 $\mu g.kg^{-1}$).

O limite máximo de resíduo de tiametoxam, expresso pela monografia da ANVISA (2020), é de 1000 $\mu g.kg^{-1}$ para aplicações via solo, com período de carência de 10 dias. Portanto os tratamentos propostos neste experimento apresentam níveis seguros para consumo humano.

5. CONCLUSÃO

O tiametoxam apresentou comportamento sistêmico em tomate-cereja. As plantas mantiveram acumulado, o máximo de 5% do inseticida, ao longo do ciclo.

Conforme a planta de tomate cresceu, ela seguiu carregando o produto. Entretanto a porcentagem de tiametoxam absorvida e acumulada em cada fração apresentou pouca oscilação ao longo do experimento. A diminuição do residual do inseticida, em $\mu g.kg^{-1}$, presente em cada fração da planta, ao longo do tempo nos mostra que à medida que a planta foi se desenvolvendo, o tiametoxam já presente na planta foi se distribuindo por toda matéria vegetal disponível.

As folhas, seguido pelas das raízes, foram as maiores acumuladoras de tiametoxam, indicando o grande potencial para controle das pragas. Os frutos apresentaram níveis residuais seguros para o consumo humano.

As flores e anteras apresentaram níveis residuais da molécula a níveis baixos, porém persistentes. O período de maior absorção, translocação e acúmulo de resíduos de tiametoxam foi observado em até 14 dias após aplicação. Portanto, quanto ao parcelamento das aplicações, ao longo do ciclo, algumas diferenças foram observadas. Em aplicações parceladas observou-se maior persistência da radioatividade ao longo do tempo, inclusive no residual de tiametoxam das flores e anteras. Portanto, a aplicação do tiametoxam, ainda que via *drench* no florescimento, tem potencial de contaminação de anteras e grãos de pólen, devido ao alto potencial de translocação do inseticida.

Devido à complexidade do tema, novas pesquisas de campo são fortemente encorajadas para que, em conjunto com os residuais de tiametoxam identificados nas flores e anteras de tomate-cereja desse experimento, inferências possam ser feitas quanto ao risco para os insetos polinizadores. De qualquer forma os dados desse estudo são essenciais para avaliação do impacto dos neonicotinóides para insetos polinizadores.

REFERÊNCIAS

ALARCÓN, A. L.; CÁNOVAS, M.; SENN, R.; CORREIA, R. The safety of thiamethoxam to pollinating bumble bees (Bombus terrestris L.) when applied to tomato plants through drip irrigation. **Communications in Agricultural and Applied Biological Sciences**, v. 70, n. 4, p. 569-579, 2005.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA - ANVISA. **Setor Regulado. Regularização de produtos e serviços. Agrotóxicos. Monografias de agrotóxicos. Monografias autorizadas (arquivos). T48 – Tiametoxam**. Braília, DF, 2020. Disponível em: https://www.gov.br/anvisa/pt-br/setorregulado/regularizacao/agrotoxicos/monografias/monografias-autorizadas/t/4551json-file-1/view. Acesso: 17 nov. 2020.

BARON, G. L.; JANSEN, V. A. A.; BROWN, M. J. F.; RAINE, N. E. Pesticide reduces bumblebee colony initiation and increases probability of population extinction. **Nature Ecology and Evolution**, v. 1, n. 9, p. 1308–1316, 2017. https://doi.org/10.1038/s41559-017-0260-1.

BLACQUIÈRE, T.; SMAGGHE, G.; VAN GESTEL, C. A. M.; MOMMAERTS, V. Neonicotinoids in bees: a review on concentrations, side-effects and risk assessment. **Ecotoxicology**, v. 21, n. 4, p. 973-992, 2012. https://doi.org/10.1007/s10646-012-0863-x.

CALVO-AGUDO, M.; GONZÁLEZ-CABRERA, J.; PICÓ, Y.; CALATAYUD-VERNICH, P.; URBANEJA, A.; DICKE, M.; TENA, A. Neonicotinoids in excretion product of phloem-feeding insects kill beneficial insects. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA**, v. 116, n. 34, p. 16817–16822, 2019. https://doi.org/10.1073/pnas.1904298116.

CAMARGO, C.; SNOW, D. D.; ONANONG, S.; HUNT, T. E.; SIEGFRIED, B. D. Residues of thiamethoxam and mefenoxam in vegetative and floral tissue of soybean at the early reproductive stage resulting from seed treatments. **Crop Protection**, v. 119, p. 134-140, 2019. https://doi.org/10.1016/j.cropro.2019.01.019.

CHRISTEN, V.; MITTNER, F.; FENT, K. Molecular Effects of Neonicotinoids in Honey Bees (Apis mellifera). **Environmental Science and Technology**, v. 50, n. 7, p. 4071-4081, 2016. https://doi.org/10.1021/acs.est.6b00678.

CORREA, R. **Controle químico**. Manaus: UFAM, 2018. Disponível em: http://www.entomologia.ufam.edu.br/Aulas/Controle_Quimico.pdf. Acesso em: 15 fev. 2018.

DIEZ-RODRIGUEZ, G. I.; BATISTA, G. C.; TREVIZAN, L. R. P.; HADDAD, M. L.; NAVA, D. E. Resíduos de tiametoxam, aldicarbe e de seus metabólitos em folhas de cafeeiro e efeito no controle de Leucoptera coffeella (Guérin-Mèneville) (Lepidoptera: Lyonetiidae). **Neotropical Entomology**, v. 35, n. 2, p. 257-263, 2006. http://dx.doi.org/10.1590/S1519-566X2006000200016.

FRANCESCHINELLI, E. B.; NETO, C. M. S.; LIMA, F. G.; BASTOS GONCALVES, B.; BERGAMINI, L. L.; RIBEIRO BERGAMINI, B. A.; ELIAS, M. A. Native bees pollinate tomato flowers and increase fruit production. **Journal of Pollination Ecology**, v. 11, n. 6, p. 41–45, 2013. https://doi.org/10.26786/1920-7603(2013)4.

FRIOL, P. S.; CATAE, A. F.; TAVARES, D. A.; MALASPINA, O.; ROAT, T. C. Can the exposure of Apis mellifera (Hymenoptera, Apiadae) larvae to a field concentration of thiamethoxam affect newly emerged bees? **Chemosphere**, v. 185, p. 56–66, 2017. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.06.113.

GARIBALDI, L. A.; STEFFAN-DEWENTER, I.; KREMEN, C.; MORALES, J. M.; BOMMARCO, R.; CUNNINGHAM, S. A.; CARVALHEIRO, L. G.; CHACOFF, N. P.; DUDENHÖFFER, J. H.; GREENLEAF, S. S.; HOLZSCHUH, A.; ISAACS, R.; KREWENKA, K.; MANDELIK, Y.; MAYFIELD, M. M.; MORANDIN, L. A.; POTTS, S. G.; RICKETTS, T. H.; SZENTGYÖRGYI, H.; VIANA, B. F.; WESTPHAL, C.; WINFREE, R.; KLEIN, A. M. Stability of pollination services decreases with isolation from natural areas despite honey bee visits. **Ecology Letters**, v. 14, p. 1062-1072, 2011. https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2011.01669.x.

GE, J.; CUI, K.; YAN, H.; LI, Y.; CHAI, Y.; LIU, X.; YU, X. Uptake and translocation of imidacloprid, thiamethoxam and difenoconazole in rice plants. **Environmental Pollution**, v. 226, p. 479–485, 2017. https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2017.04.043.

GIERER, F.; VAUGHAN, S.; SLATER, M.; THOMPSON, H. M.; ELMORE, J. S.; GIRLING, R. D. A review of the factors that influence pesticide residues in pollen and nectar: Future research requirements for optimising the estimation of pollinator exposure. **Environmental Pollution**, v. 249, p. 236–247, 2019. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.03.025.

GUPTA, S.; GAJBHIYE, V. T.; GUPTA, R. K. Soil Dissipation and Leaching Behavior of a Neonicotinoid Insecticide Thiamethoxam. **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 80, n. 5, p. 431–437, 2008. https://doi.org/10.1007/s00128-008-9420-y.

HOU, J.; XIE, W.; HONG, D.; ZHANG, W.; LI, F.; QIAN, Y.; HAN, C. Simultaneous determination of ten neonicotinoid insecticides and two metabolites in honey and Royal-jelly by solid−phase extraction and liquid chromatography−tandem mass spectrometry. **Food Chemistry**, v. 270, p. 204–213, 2019. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.07.068.

HUTH, C.; ROGGIA, S.; CANTONE, W.; GUEDES, J. V. C. Efeito sistêmico de Inseticida (tiametoxam + lambdacialotrina) em planta de soja. In: Congresso Brasileiro de Soja, 6., 2012, Cuiabá, MT. Disponível em: https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/945288/1/101s232.pdf. Acesso em: 15 fev. 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS – IBAMA. **Ibama aumenta proteção a abelhas com nova norma sobre avaliação de agrotóxicos**. Brasília, DF, 2018. Disponível em: http://www.ibama.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=1012. Acesso em: 10 maio 2018.

KARMAKAR, R.; KULSHRESTHA, G. Persistence, metabolism and safety evaluation of thiamethoxam in tomato crop. **Pest Management Science**, v. 65, p. 931-937, 2009. doi:10.1002/ps.1776.

KESSLER, S. C.; TIEDEKEN, E. J.; SIMCOCK, K. L.; DERVEAU, S.; MITCHELL, J.; SOFTLEY, S.; RADCLIFFE, A.; STOUT, J. C.; WRIGHT, G. A. Bees prefer foods containing neonicotinoid pesticides. **Nature**, v. 521, n. 7550, p. 74–76, 2015. https://doi.org/10.1038/nature14414.

LAYCOCK, I.; COTTERELL, K. C.; O'SHEA-WHELLER, T. A.; CRESSWELL, J. E. Effects of the neonicotinoid pesticide thiamethoxam at field-realistic levels on microcolonies of Bombus terrestris worker bumble bees. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 100, p. 153–158, 2014. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2013.10.027.

LI, Y.; SU, P.; LI, Y.; WEN, K.; BI, G.; COX, M. Adsorption-desorption and degradation of insecticides clothianidin and thiamethoxam in agricultural soils. **Chemosphere**, v. 207, p. 708–714, 2018. https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2018.05.139.

LYMAN, W. J.; REEHL, W. F.; ROSENBLATT, D. H. **Handbook of Chemical Property Estimation Methods**. Washington, DC: American Chemical Society, 1990. p. 8-12.

MACBEAN, C. (Ed.). **The ePesticide Manual**. Thiamethoxam. Version 5.0.1. 15. ed. Surrey, UK: British Crop Protection Council, 2010. (153719-23-4).

MAKISHIMA, N.; MELO, W. F de. O rei das hortaliças. **Cultivar Hortaliças e Frutas**, n. 29, dez. 2004/jan. 2005. Disponível em: https://www.grupocultivar.com.br/ativemanager/uploads/arquivos/artigos/hf29_rei.pdf . Acesso em: 26 nov. 2019.

MARTINS, R. G.; MARTINS, M. B. G.; SILVA, J. M.; PEREIRA, M. A.; APPEZZATO-DA-GLÓRIA, B.; CASTRO, P. R. C. Thiamethoxam on the histological characteristics of sugarcane young roots. **Ciência Rural**, v.42, n.11, p. 1936-1940, 2012.

MATIAS, R. S. **Como agem os inseticidas nos insetos**. Cascavel: Pragas & Eventos, 2016. Disponível em: https://www.pragaseeventos.com.br/saude-ambiental/como-agem-os-inseticidas-nos-insetos/. Acesso: 02 fev. 2018.

MUSTARD, J. A.; GOTT, A.; SCOTT, J.; CHAVARRIA, N. L.; WRIGHT, G. A. Honeybees fail to discriminate floral scents in a complex learning task after consuming a neonicotinoid pesticide. **Journal of Experimental Biology**, v. 223, n. 5, art. ID jeb217174, 2020. doi: 10.1242/jeb.217174.

PRATISSOLI, D.; CARVALHO, J. (2016). **Guia de Campo**: pragas da cultura do tomateiro. 1. ed. Alegre, ES: NUDEMAFI, Centro de Ciências Agrárias, UFES, 2015. 35 p. (Série Técnica, 1). Disponível em: https://docplayer.com.br/71585077-Guia-de-campo-pragas-da-cultura-do-tomateiro.html#:~:text=A%20principal%20cultura%20que%20ele,cabe%C3%A7a%2C%20antenas%20e%20t%C3%B3rax%20escuros. Acesso: 26 nov. 2019.

RADOLINSKI, J.; WU, J.; XIA, K.; HESSION, W. C.; STEWART, R. D. Plants mediate precipitation-driven transport of a neonicotinoid pesticide. **Chemosphere**, v. 222, p. 445–452, 2019. https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2019.01.150.

RANGEL, L. E. P.; BOTTON, M.; PAPA, G.; YAMAMOTO, P. T.; ROGGIA S. **Uso de neonicotinóides no Brasil** – Situação atual dos produtos registrados. Londrina: Embrapa Soja, 2014. 7 p. Disponível em: https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1020643/1/Botton2014RelacaoAgriculturaApicultura.pdf. Acesso: 31 jan. 2018.

REID, R. J.; TROCZKA, B. J.; KOR, L.; RANDALL, E.; WILLIAMSON, M. S.; FIELD, L. M.; Nauen, R.; Bass, C.; DAVIES, T. G. E. Assessing the acute toxicity of insecticides to the buff-tailed bumblebee (Bombus terrestris audax). **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v. 166, art. ID 104562, 2020. https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2020.104562.

REIS FILHO, J.; MARIN, J.; FERNANDES, P. Os Agrotóxicos na produção de tomate de mesa na região de Goianápolis, Goiás. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 39, n. 4, p. 307-316, 2009.

RUNDLÖF, M., ANDERSSON, G. K. S., BOMMARCO, R., FRIES, I., HEDERSTRÖM, V., HERBERTSSON, L., JONSSON, O.; KLATT, B. K.; PEDERSEN, T. R.; YOURSTONE, J.; SMITH, H. G. Seed coating with a neonicotinoid insecticide negatively affects wild bees. **Nature**, v. 521, n. 7550, p. 77–80, 2015. https://doi.org/10.1038/nature14420.

SALVARREY, S.; SANTOS, E.; ARBULO, N.; GIMÉNEZ, G.; INVERNIZZI, C. Characteristics of the tomato fruit (Solanum lycopersicum) using native bumblebees (Bombus atratus) as pollinators in greenhouse. **Agrociencia** (Uruguay), v. 24, n. 1, p. 1–10, 2020. https://doi.org/10.31285/agro.24.101.

SANTOS, A. B.; NASCIMENTO, F. S. Diversidade de visitantes florais e potenciais polinizadores de Solanum lycopersicum (Linnaeus) (Solanales: Solanaceae) em cultivos orgânicos e convencionais. **Neotropical Biology and Conservation**, v. 6, n. 3, p. 162–169, 2012. https://doi.org/10.4013/nbc.2011.63.03.

SCORZA JUNIOR, R. P.; RIGITANO, R. L. O. Sorção, degradação e lixiviação do inseticida tiametoxam em dois solos de Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 5, p. 564-572, 2012. https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000500013.

SECHSER, B.; FREULER, J. The impact of thiamethoxam on bumble bee broods (Bombus terrestris L.) following drip application in covered tomato crops. **Anzeiger für Schädlingskunde**, v. 76, p. 74-77, 2003. 10.1046/j.1439-0280.2003.03017.x.

SHI, T.-F.; WANG, Y.-F.; LIU, F.; QI, L.; YU, L.-S. Sublethal Effects of the Neonicotinoid Insecticide Thiamethoxam on the Transcriptome of the Honey Bees (Hymenoptera: Apidae). **Journal of Economic Entomology**, v. 110, n. 6, p. 2283–2289, 2017. https://doi.org/10.1093/jee/tox262

SILVA-NETO, C. M.; BERGAMINI, L. L.; ELIAS, M. A. S.; MOREIRA, G. L.; MORAIS, J. M.; BERGAMINI, B. A. R.; FRANCESCHINELLI, E. V. Alta riqueza de espécies de polinizadores nativos em plantações Brasileiras de tomateiro. **Brazilian Journal of Biology**, v. 77, n. 3, p. 506–513, 2017. https://doi.org/10.1590/1519-6984.17515.

SWANN, R. L.; LASKOWSKI, D. A.; MCCALL, P. J.; VANDER KUY, K.; DISHBURGER, H. J. A rapid method for the estimation of the environmental parameters octanol/water partition coefficient, soil sorption constant, water to air ratio, and water solubility. **Residue Reviews**, v. 85, p. 17-28, 1983. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-5462-1_3.

STONER K. A.; EITZER B. D. Movement of Soil-Applied Imidacloprid and Thiamethoxam into Nectar and Pollen of Squash (Cucurbita pepo). **PLoS ONE**, v. 7, n. 6, art. ID e39114, 2012. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0039114.

TORRES, F. Z. V.; RIGITANO, R. L. O. Translocação do inseticida tiametoxam no floema de mamoneiras, utilizadas como plantas-modelo. **Pesticidas: Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente**, v. 22, p. 51-64, 2012.

TORRES-RUIZ, A.; JONES, R. W. Comparison of the efficiency of the bumble bees Bombus impatiens and Bombus ephippiatus (Hymenoptera: Apidae) as pollinators of tomato in greenhouses. **Journal of Economic Entomology**, v. 105, n. 6, p. 1871–1877, 2012. https://doi.org/10.1603/EC12171.

WOODCOCK, B. A.; EDWARDS, M.; REDHEAD, J.; MEEK, W. R.; NUTTALL, P.; FALK, S.; NOWAKOWSKI, M.; PYWELL, R. F. Crop flower visitation by honeybees, bumblebees and solitary bees: Behavioural differences and diversity responses to landscape. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 171, p. 1–8, 2013. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.03.005