

UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL  
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA  
CAMPUS CHAPECÓ

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA ATMOSFÉRICA E DA REDUÇÃO DA  
UMIDADE DO SOLO SOBRE O POTENCIAL TÓXICO DE CLOTIANIDINA  
PARA COLÊMBOLOS *Folsomia candida*, EM NEOSSOLO**

THALIA SMANIOTTO GRACIANI

ORIENTADOR Prof. Dr. Paulo Roger Lopes Alves

Outubro – 2021

**THALIA SMANIOTTO GRACIANI**


**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA ATMOSFÉRICA E DA  
REDUÇÃO DA UMIDADE DO SOLO SOBRE O POTENCIAL  
TÓXICO DE CLOTIANIDINA PARA COLÊMBOLOS *Folsomia  
candida*, EM NEOSSOLO**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito  
para obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária da  
Universidade Federal da Fronteira Sul.

**Orientador: Prof. Dr. Paulo Roger Lopes Alves**

Este trabalho de conclusão de curso foi defendido e  
aprovado pela banca em: 04/10/2021

**BANCA EXAMINADORA**

  
**Prof. Dr. Paulo Roger Lopes Alves – UFFS**

Digitally signed by Marlon Luiz Neves da Silva  
DN: cn=Engenharia Ambiental e Sanitária,  
ou=Universidade Federal da Fronteira Sul,  
c=Brasilion Luiz Neves da Silva,  
email=marlon@uffrs.edu.br  
**Marlon Luiz  
Neves da Silva**  
**Prof. Dr. Marlon Luiz Neves da Silva - UFFS**

  
**Marco Aurélio Tramontin da Silva**  
**Prof. Dr. Entomologia**  
**SIAPÉ: 1862768**  
**UFFS - Chapecó/SC**  
**Prof. Dr. Marco Aurélio Tramontin da Silva - UFFS**

# INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA ATMOSFÉRICA E DA REDUÇÃO DA UMIDADE DO SOLO SOBRE O POTENCIAL TÓXICO DE CLOTIANIDINA PARA COLÊMBOLOS *Folsomia candida*, EM NEOSSOLO

Thalia Smaniotto Graciani<sup>1\*</sup>  
Paulo Roger Lopes Alves<sup>2</sup>

## RESUMO

Os efeitos do aumento na temperatura atmosférica e da redução da umidade do solo sobre a toxicidade de uma formulação comercial para tratamento de sementes a base de clotianidina foram avaliados através de testes de toxicidade crônica com colêmbolos *Folsomia candida* em um solo natural tropical (Neossolo). Também foi avaliado o risco da clotianidina para os colêmbolos utilizando a abordagem Razão Toxicidade-Exposição (RTE). Para a realização dos ensaios, os organismos foram expostos a concentrações crescentes de clotianidina sob as temperaturas de 20, 25 e 27 °C em combinação com duas condições de umidade do solo: 30 e 60% da capacidade de retenção de água (CRA). O efeito da temperatura e da umidade na reprodução dos colêmbolos foi verificado por meio do número de juvenis de *F. candida* gerados após 28 dias de exposição ao inseticida no solo. Foi observado que o aumento da temperatura atmosférica aumentou a toxicidade da clotianidina - baseado nos valores de CE50 (concentração que reduz a reprodução dos organismos em 50%, em relação ao controle). A influência da umidade do solo na toxicidade da molécula não foi clara (baseada nos valores de CE50), no entanto, houve redução na reprodução dos colêmbolos em todos os tratamentos com menor umidade do solo (incluindo o controle). Em geral, ao estimar o risco ambiental da clotianidina para a *F. candida* em Neossolo, os valores de RTE também demonstraram aumento do risco com o aumento da temperatura, indicando que os cenários de mudança climática devem ser considerados nas avaliações de risco ambiental de agrotóxicos e que as descobertas deste estudo são um tanto quanto preocupantes, pois podem representar uma alteração no equilíbrio do solo.

Palavras-chave: Mudanças Climáticas; Fauna do solo; Risco Ambiental; Toxicidade.

## ABSTRACT

The effects of increasing atmospheric temperature and the reduction of soil moisture on the toxicity of a commercial formulation for seed treatment based on clothianidin were assessed through chronic toxicity tests with collembolans *Folsomia candida* in a natural tropical soil (Entisol). The risk of clothianidin for collembolans was also evaluated using the Toxicity-

---

<sup>1</sup>Acadêmica do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal da Fronteira Sul, *Campus* Chapecó, \*thaalia\_thaly@hotmail.com

<sup>2</sup>Professor orientador do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal da Fronteira Sul, *Campus* Chapecó

Exposure Ratio (TER) approach. To carry out the tests, the organisms were exposed to increasing concentrations of clothianidin at temperatures of 20, 25 and 27 °C in combination with two soil moisture conditions: 30 and 60% of the water holding capacity (WHC). The effect of temperature and soil moisture on collembolans reproduction was verified through the number of *F. candida* juveniles generated after 28 days of exposure to the insecticide in the soil. It was observed that the increase in atmospheric temperature increased the toxicity of clothianidin - based on the EC50 values (concentration that reduces collembolans reproduction by 50%, compared to the control). The influence of soil moisture on the toxicity of the molecule was not clear (based on EC50 values), however, there was a reduction in collembolans reproduction in all treatments with lower soil moisture (including the control). In general, when estimating the environmental risk of clothianidin for *F. candida* in Entisol, the TER values also showed increased risk with increasing temperature, indicating that climate change scenarios should be considered in pesticide environmental risk assessments. and that the findings of this study are somewhat worrying, as they may represent a change in soil balance.

Keywords: Climate Changes; Soil Fauna; Environmental Risk; Toxicity.

## 1 INTRODUÇÃO

A rápida e atual taxa de mudança climática global está provocando sérios efeitos sobre muitas espécies (FRANKS; HOFFMANN, 2012). Estudos têm comprovado que as mudanças climáticas podem afetar a ecologia e a evolução das espécies existentes no planeta Terra (SIEPIELSKI, 2017). Alguns resultados indicam que é possível que haja um aumento no estresse corporal das espécies, resultando em inibição na reprodução dos indivíduos, mudanças comportamentais, redução no tamanho do corpo, alterações no metabolismo e fisiologia, bem como nas interações hospedeiro-parasita, podendo provocar, em alguns casos, até mesmo a extinção, em virtude de uma condição de menor umidade do solo e aumento da temperatura atmosférica (DAUFRESNE; LENGFELLNER; SOMMER, 2009; PRATHER *et al.*, 2013; BANDOW *et al.*, 2014a; GONZÁLEZ-ALCARAZ; VAN GESTEL, 2016; MEESTER; STOKS; BRANS, 2018).

Além disto, alguns autores apontam, que embora as respostas evolutivas das espécies possam fornecer uma proteção inicial contra as mudanças climáticas, elas não garantem, necessariamente, que haverá a sobrevivência (FRANKS; HOFFMANN, 2012; MEESTER; STOKS; BRANS, 2018). Em muitos casos, sabe-se que a plasticidade fenotípica dos organismos, ou seja, a capacidade que os organismos têm de se adaptar, alterando sua fisiologia ou morfologia devido as mudanças nas condições ambientais, pode não ser suficiente para que as populações acompanhem a rapidez das mudanças climáticas (FRANKS;

HOFFMANN, 2012; COCK *et al.*, 2013; DUPUTIÉ *et al.*, 2015; GUNDERSON; STILLMAN, 2015).

Por outro lado, cresce a preocupação com a poluição de solos agrícolas por inseticidas neonicotinoides (JESCHKE *et al.*, 2011; BASS; FIELD, 2018; HENNIG *et al.*, 2020). Nos últimos anos, esse grupo químico de agrotóxicos passou a ser utilizada com grande frequência no tratamento de sementes agrícolas, devido à proteção oferecida para as plântulas, após a germinação. Sua importância está relacionada à eficiência no controle de insetos-pragas que se alimentam da seiva e do tecido vegetal da planta (JESCHKE *et al.*, 2011; GOULSON, 2013; BASS; FIELD, 2018). No Brasil, o consumo desse grupo químico de inseticidas cresceu significativamente na última década, passando de 1.399,15 toneladas (soma das formulações contendo imidacloprido) em 2009, para 11.001,85 toneladas em 2019 (soma dos ingredientes ativos imidacloprido e acetamiprido). Desta forma, esse consumo, em 10 anos, representou um aumento de 686,32% na quantidade de neonicotinoides consumidos em lavouras brasileiras (IBAMA, 2016).

Dentro desse grupo químico está a clotianidina, pertencente ao grupo das N-nitroguanidinas, que atua como agonista nos receptores nicotínicos de acetilcolina no sistema nervoso central dos insetos, provocando paralisia e morte dos organismos expostos (JESCHKE *et al.*, 2011; GOULSON, 2013). Este ingrediente ativo (i.a.) pode ser encontrado em formulações comerciais de inseticidas utilizados para o tratamento de sementes no Brasil.

Ao serem aplicados na lavoura, boa parte dos inseticidas atingem o solo, passando por diversos processos, os quais determinam o comportamento dos agrotóxicos no ambiente. Estima-se que pelo menos de 98,5% da clotianidina aplicada no tratamento de sementes permanece no solo após a semente germinar (ALFORD; KRUPKE, 2017). Portanto, podem causar toxicidade para os organismos que vivem neste solo e comprometer o desempenho dos serviços ecossistêmicos por eles prestados (DE SILVA; PATHIRATNE; VAN GESTEL, 2009; ALVES; CARDOSO, 2016; DE LIMA; SILVA *et al.*, 2019; RITCHIE *et al.*, 2019; BANDEIRA *et al.*, 2020).

Espécies de invertebrados do solo têm sido utilizadas com o objetivo de avaliar o impacto da clotianidina sobre a fauna do solo (DE PERRE *et al.*, 2014; RITCHIE *et al.*, 2019; DE LIMA; SILVA *et al.*, 2019; BANDEIRA *et al.*, 2021). No entanto, até o momento, ainda não se conhece os efeitos considerando a influência das mudanças climáticas sobre o potencial tóxico da clotianidina.

A temperatura é um indicador importante em estudos ecotoxicológicos, pois pode atuar como estressor, além de influenciar o destino e o transporte de poluentes presentes no

meio ambiente, bem como fazer com que os organismos aumentem a absorção de químicos e acelerem suas atividades metabólicas (DE SILVA; PATHIRATNE; VAN GESTEL, 2009; VELKI; EČIMOVIĆ, 2015). O relatório de mudanças climáticas emitido em 2021 pelo Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) aponta um aumento na temperatura média da superfície global, até 2100, de 1,0 a 1,8 °C em um cenário de emissões de gases de efeito estufa (GEE) controlados, podendo chegar a temperaturas de 3,3 a 5,7 °C caso estas emissões sejam exageradas (IPCC, 2021). Outro indicador considerável é o teor de umidade do solo que, quando reduzido, pode afetar a dinâmica e a toxicidade desses poluentes para organismos que vivem no solo, bem como limitar o desenvolvimento de espécies de colêmbolos (CHOI *et al.*, 2006; GONZÁLEZ-ALCARAZ; VAN GESTEL, 2016; HENNIG *et al.*, 2020). Simulações por meio de modelos matemáticos apontam que, em muitas áreas do globo, haverá secas generalizadas para os próximos 30-90 anos, a partir de 2010, resultado da diminuição da precipitação e do aumento da evaporação devido às altas temperaturas. Com isso, espera-se que a umidade do solo reduza significativamente em boa parte do mundo (DAI, 2013).

Neste sentido, alguns estudos demonstram que o aumento da temperatura e a redução da umidade no solo influenciam na toxicidade de outros agrotóxicos e outros poluentes para a fauna do solo (BANDOW *et al.*, 2014a; BARMENTLO *et al.*, 2016; JEGEDE; OWOJORI; RÖMBKE, 2017; HACKENBERGER *et al.*, 2018; HENNIG *et al.*, 2020; BANDEIRA *et al.*, 2020). Desta forma, objetivou-se avaliar se há impacto do aumento da temperatura atmosférica e da redução da umidade do solo na toxicidade crônica e risco ambiental da clotianidina para colêmbolos da espécie *Folsomia candida*. As hipóteses deste estudo foram: 1) O aumento da temperatura atmosférica aumenta a toxicidade da clotianidina para *F. candida* em neossolo; 2) A redução da umidade do solo aumenta a toxicidade da clotianidina para *F. candida* em neossolo; 3) A combinação entre o aumento da temperatura e a redução da umidade do solo aumentam a toxicidade da clotianidina em níveis superiores aos das influências individuais de cada um dos fatores (temperatura atmosférica ou umidade do solo) na toxicidade da molécula e 4) O risco estimado para temperaturas mais elevadas é maior quando comparado à temperatura padrão (20 °C).

## 2 MATERIAL E METÓDOS

### 2.1 ORGANISMO TESTE

A criação dos colêmbolos *F. candida* foi realizada em sala climatizada, com controle de temperatura ( $20 \pm 2$  °C) e luminosidade (fotoperíodo de 12 horas), como recomenda a ISO 11267 (ISO, 2014). A espécie foi criada no Laboratório de Botânica, Ecologia e Entomologia da Universidade Federal da Fronteira Sul, *campus* Chapecó, sendo mantida em recipientes cilíndricos de plástico contendo uma mistura composta por gesso, água e carvão ativado (pó), em uma proporção de 10:7:1 (p:p:p), respectivamente. Os recipientes de criação possuíam tampas transparentes com pequenos furos que permitiram a troca de gases do meio de cultivo com o ambiente externo. Duas vezes por semana, os indivíduos foram alimentados com levedura seca granulada (*Saccharomyces cerevisiae*), sendo necessária a reposição da umidade no meio através da adição de algumas gotas de água destilada.

### 2.2 SOLO TESTE

O solo utilizado no teste de toxicidade crônica foi um Neossolo Quartzarênico (solo arenoso), coletado no município de Araranguá (SC), em área sem histórico de contaminação. As amostras foram retiradas na camada superficial de 0 a 20 cm de profundidade, sendo posteriormente peneiradas e desfaunadas por meio de três ciclos de congelamento e descongelamento.

As propriedades físicas e químicas do neossolo utilizado nos testes estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades físicas e químicas (média  $\pm$  desvio padrão) do neossolo usado nos testes de toxicidade crônica com *Folsomia candida*.

Parâmetro	Neossolo
Potencial hidrogeniônico - pH Água (1:1)	4,40 $\pm$ 0,10
Matéria Orgânica - MO % (m/v)	2,20 $\pm$ 0,10
Fósforo - P (mg dm <sup>-3</sup> )	4,80 $\pm$ 1,00
Potássio - K (mg dm <sup>-3</sup> )	42,0 $\pm$ 2,80
Cálcio - Ca (cmolc dm <sup>-3</sup> )	0,55 $\pm$ 0,10
Magnésio - Mg (cmolc dm <sup>-3</sup> )	0,45 $\pm$ 0,10
Alumínio - Al (cmolc dm <sup>-3</sup> )	0,30 $\pm$ 0,00
H + Al (cmolc dm <sup>-3</sup> )	3,99 $\pm$ 1,30

Cobre - Cu (mg dm <sup>-3</sup> )	0,70 ± 0,10
Ferro - Fe (g dm <sup>-3</sup> )	>5,00
Manganês - Mn (mg dm <sup>-3</sup> )	<2,50
Zinco - Zn (mg dm <sup>-3</sup> )	1,10 ± 0,10
Capacidade de Troca Catiônica - CTC (cmolc dm <sup>-3</sup> )	1,36 ± 0,10
Saturação por bases (%)	22,2 ± 3,30
Argila (g kg <sup>-1</sup> )	4,10 ± 0,20
Silte (g kg <sup>-1</sup> )	2,10 ± 0,10
Areia (g kg <sup>-1</sup> )	93,8 ± 0,40
Capacidade de Retenção de Água do solo - CRA (%)	31,6 ± 1,10

Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

### 2.3 SUBSTÂNCIA TESTE

O i.a. clotianidina foi testado por meio de uma formulação comercial utilizada para tratamento de sementes: INSIDE FS® (600 g de i.a. L<sup>-1</sup>).

As concentrações aplicadas no solo para os ensaios de toxicidade crônica (0,011; 0,017; 0,026; 0,039 e 0,06 mg kg<sup>-1</sup>) foram definidas com base nos resultados de ensaios previamente realizados em laboratório (dados não apresentados).

Antes do início do ensaio, as porções de neossolo foram pesadas e contaminadas com as concentrações crescentes de clotianidina, artificialmente em laboratório. A contaminação do solo foi realizada de modo com que a umidade do teste se mantivesse em 30 (simulação de estresse hídrico) ou 60% (condição padrão) da CRA do neossolo. Também foi realizado um tratamento controle, contendo somente água destilada.

### 2.4 ENSAIO DE TOXICIDADE CRÔNICA

Os ensaios foram executados por meio de delineamento inteiramente casualizado. A temperatura de 20 °C utilizada em um dos testes, foi baseada em condições padrão (ISO, 2014). Para a realização de um segundo teste, foi considerado um cenário típico de regiões tropicais, utilizando a temperatura de 25 °C (NIVA *et al.*, 2016), e simulando um cenário de aquecimento global para um terceiro teste, foi considerado um aumento na temperatura atmosférica de 2 °C, utilizando a temperatura de 27 °C (IPCC, 2021). Foram adicionados 30 g de neossolo, previamente contaminados ou do tratamento controle, em recipientes cilíndricos de vidro medindo aproximadamente, 4 cm de diâmetro e 9 cm de altura. Os ensaios foram realizados em cinco réplicas por tratamento (concentrações/controle) (ISO 2014). Para cada



tratamento, foi realizada uma réplica extra, sem a presença de colêmbolos, para que após o término do ensaio fosse possível fazer a verificação da umidade e do pH do solo.

Os ensaios com colêmbolos seguiram o protocolo recomendado pela ISO 11267 (ISO, 2014). Assim, 10 indivíduos com idade sincronizada entre 10 e 12 dias de vida foram adicionados aos recipientes. Em seguida, foram inseridos aproximadamente 2 mg de fermento seco granulado por réplica, que serviram, durante as duas primeiras semanas de ensaio, como alimento para os organismos. Os recipientes de teste foram pesados e o valor foi anotado para que o controle de umidade pudesse ser feito. Sequencialmente, eles foram fechados hermeticamente e inseridos na sala climatizada (quando o ensaio foi a 20 °C) ou na câmara climatizada do tipo B.O.D. (quando os ensaios foram realizados a 25 e 27 °C). Durante o período do ensaio, duas vezes na semana, os recipientes foram abertos para permitir a troca dos gases contidos em seu interior e para se fazer o ajuste do teor de umidade do solo. O ajuste da umidade do solo foi realizado por meio da inserção de algumas gotas de água destilada, por diferença de peso. Ao 14º dia do início do ensaio, os organismos foram novamente alimentados e, após o 28º dia, o ensaio foi avaliado. Para isto, o conteúdo dos recipientes foi transferido para recipientes maiores, adicionando-se água para que os organismos pudessem flutuar e algumas gotas de tinta preta para permitir a distinção entre os organismos e o solo. Deste modo, foi possível contabilizar visualmente o número de colêmbolos adultos sobreviventes. Para a avaliação do número de juvenis gerados, cada réplica foi fotografada com vista superior do recipiente por meio de uma câmera digital e a contagem do número de indivíduos foi realizada com o auxílio do software computacional Image J® versão 1.47v.

## 2.5 ANÁLISE DOS DADOS

Inicialmente, a normalidade e a homogeneidade da variância dos dados foram testadas por meio dos testes de Kolmogorov-Smirnov e Bartlett, respectivamente. Quando necessário, foram realizadas transformações logarítmicas para atender as pressuposições da Análise de Variância (ANOVA). A seguir, quando atendidas essas pressuposições, as diferenças entre os resultados dos ensaios de reprodução foram verificadas por meio da ANOVA de uma via. Em caso de diferença significativa, os valores médios dos tratamentos foram comparados com os controles por meio do teste *post-hoc* de Dunnett, por meio do software Statistica® versão 13.0, visando determinar as concentrações que causaram redução significativa no número de

juvenis ( $p < 0,05$ ), quando comparadas ao controle. A partir destes resultados, foram determinados os valores de CENO (maior concentração testada sem efeito observado) e CEO (menor concentração testada com efeito observado) dos ensaios de toxicidade crônica (reprodução). Ainda, foram determinados os valores de CE<sub>10</sub> e CE<sub>50</sub> (concentração que reduz a reprodução dos organismos em 10 e 50%, em relação ao controle, respectivamente) por meio de regressões não lineares com modelos pré-definidos por Environment Canadá (2007), por meio do software Statistica® versão 13.0.

Uma ANOVA fatorial foi realizada para verificar se a interação entre as concentrações de clotianidina, a temperatura e a umidade do solo são significativas sobre a reprodução dos colêmbolos.

Também foi realizado um teste de razão de verossimilhança ( $p < 0,05$ ), com o objetivo de encontrar diferenças significativas entre os valores de CE<sub>50</sub> entre diferentes umidades para uma mesma temperatura e entre diferentes temperaturas para uma mesma umidade, de acordo com Natal-da-Luz *et al.* (2011).

A concentração ambiental estimada (CAE), 28 dias após a inserção das sementes tratadas no solo, foi estimada para permitir o cálculo do risco da clotianidina para os colêmbolos. Para estimar a CAE, adotou-se a menor dose recomendada para a formulação comercial INSIDE FS® para sementes de milho no Brasil (210 g i.a. por 100 kg de sementes), bem como uma densidade de semeadura de 30 kg de sementes de milho por hectare, resultando em uma incorporação de 63 g i.a. ha<sup>-1</sup> nos primeiros 10 cm do perfil do solo. Foi considerado o valor de 1,5 g cm<sup>3</sup> para densidade do neossolo para calcular a massa total de solo em contato com a quantidade de clotianidina aplicada, bem como uma interceptação do inseticida pelas plantas de 1,5% (ALFORD; KRUPKE, 2017). Além disso, adotou-se um tempo de meia-vida da clotianidina (DT<sub>50</sub>) de 58 dias para a temperatura de 20 °C (DE LIMA; SILVA *et al.*, 2019) e estimou-se através do software ESCAPE® o DT<sub>50</sub> para as temperaturas de 25 e 27 °C, sendo 39 e 33 dias, respectivamente. A CAE foi estimada por meio do software ESCAPE®.

O risco da clotianidina para *F. candida* foi calculado seguindo a abordagem da Razão Toxicidade-Exposição (RTE) (EC, 2003). O cálculo da RTE foi obtido através da divisão dos valores de CE<sub>10</sub> para cada teor de umidade testado, nas diferentes temperaturas, pela CAE:  $RTE = CE_{10} / CAE$ . Assume-se que existe risco significativo da substância testada quando  $RTE < 5$  (EC, 2003).

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 VALIDAÇÃO DOS TESTES

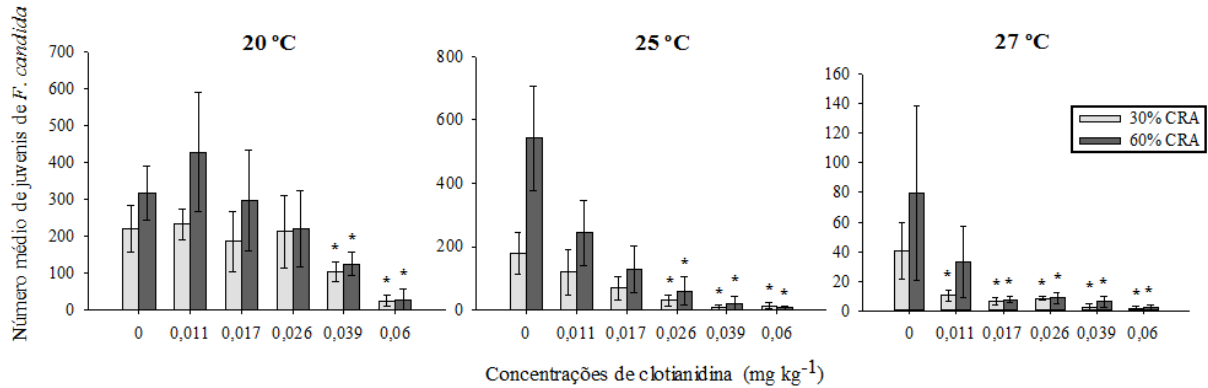
Para os ensaios realizados a 20 e 25 °C, sob ambas as umidades testadas (30 ou 60% da CRA), os critérios de validação estabelecidos pela ISO 11 267 (ISO, 2014) foram atendidos, isto é: o número médio de juvenis no tratamento controle foi superior a 100, a mortalidade média dos organismos adultos foi inferior a 20% e o coeficiente de variação (CV) obtido nos ensaios foi menor que 30%. Para os testes realizados na temperatura de 27 °C, estes critérios não foram atendidos: o número médio de organismos juvenis para 30% da CRA foi igual a  $40 \pm 19$  e para 60% da CRA,  $80 \pm 59$  organismos juvenis, bem como o CV calculado foi igual a 47,4% e 74,6% para as umidades de 30 e 60%, respectivamente (Figura 1). No entanto, visto que foram obtidas doses-resposta satisfatórias, os resultados foram utilizados no estudo.

#### 3.2 ENSAIO DE TOXICIDADE CRÔNICA

O efeito da clotianidina de redução na reprodução do colêmbolos se iniciou nas mesmas concentrações para os testes realizados sob diferentes regimes de umidade, tanto em 20, quanto em 25 °C ( $CEO_{30\%}$  e  $CEO_{60\%} = 0,039 \text{ mg kg}^{-1}$ ;  $CEO_{30\%}$  e  $CEO_{60\%} = 0,026 \text{ mg kg}^{-1}$ , respectivamente; Figura 1). Somente sob a temperatura de 27 °C, a redução foi observada em concentrações diferentes para 30 e 60% da CRA, sendo  $0,011$  e  $0,017 \text{ mg kg}^{-1}$ , respectivamente. Entretanto, quando comparados os valores de  $CE_{10}$  e  $CE_{50}$ , para as duas umidades (30 e 60% da CRA), dentro de uma mesma temperatura (20 ou 25 ou 27 °C), o teste apontou que não houve diferença significativa entre os fatores, indicando que não foi possível verificar uma influência clara da umidade na toxicidade da clotianidina (Tabela 2).

A toxicidade da clotianidina para *F. candida* aumentou com o aumento da temperatura, visto que os valores de  $CE_{50}$  diminuíram à medida que a temperatura aumentou (Tabela 2 e Figura 2). Sob condição de 30% da CRA, o valor de  $CE_{50}$  observado para a temperatura de 27 °C foi aproximadamente 2,6 vezes maior do que a 25 °C, e 7,2 vezes maior do que a 20 °C. Já na condição de 60% da CRA, a toxicidade foi semelhante sob as temperaturas de 25 °C e 27 °C. Contudo, para essa condição de umidade padrão, o valor de  $CE_{50}$  sob 27 °C foi cerca de 4,4 vezes menor, comparado a 20 °C (Tabela 2).

Figura 1 – Número médio de juvenis de colêmbolos *Folsomia candida* encontrados em neossolo, após 28 dias de exposição a concentrações crescentes de clotianidina, sob diferentes regimes de umidade do solo (30% e 60% da CRA) e temperatura atmosférica (20, 25 e 27 °C). O asterisco (\*) indica redução significativa do número médio de juvenis em relação ao tratamento controle ( $p < 0,05$ ).



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Tabela 2 – Parâmetros ecotoxicológicos dos testes de toxicidade crônica com colêmbolos *Folsomia candida*, em Neossolo, sob diferentes regimes de umidade do solo (30% e 60% da CRA) e temperatura atmosférica (20, 25 e 27 °C). Os intervalos de confiança de 95% das CE<sub>10</sub> e CE<sub>50</sub> estão apresentados entre parênteses.

Parâmetro	20 °C		25 °C		27 °C	
	Concentração (mg kg <sup>-1</sup> )					
	30% CRA	60% CRA	30% CRA	60% CRA	30% CRA	60% CRA
CENO	0,026	0,026	0,017	0,017	< 0,011	0,011
CEO	0,039	0,039	0,026	0,026	0,011	0,017
CE <sub>10</sub>	0,0225 (0,0091 - 0,0359)	0,0159 (0,0051 - 0,0267)	0,0063 (0,0019 - 0,0107)	0,0038 (0,0006 - 0,0071)	0,0014 (0,0005 - 0,0023)	0,0013 (-)*
CE <sub>50</sub>	0,0401 (0,0314 - 0,0488) <sup>aA</sup>	0,0305 (0,0218 - 0,0392) <sup>aA</sup>	0,0143 (0,0101 - 0,0185) <sup>aB</sup>	0,0101 (0,0068 - 0,0134) <sup>aB</sup>	0,0056 (0,0025 - 0,0087) <sup>aC</sup>	0,0070 (0,0025 - 0,0114) <sup>aB</sup>

Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

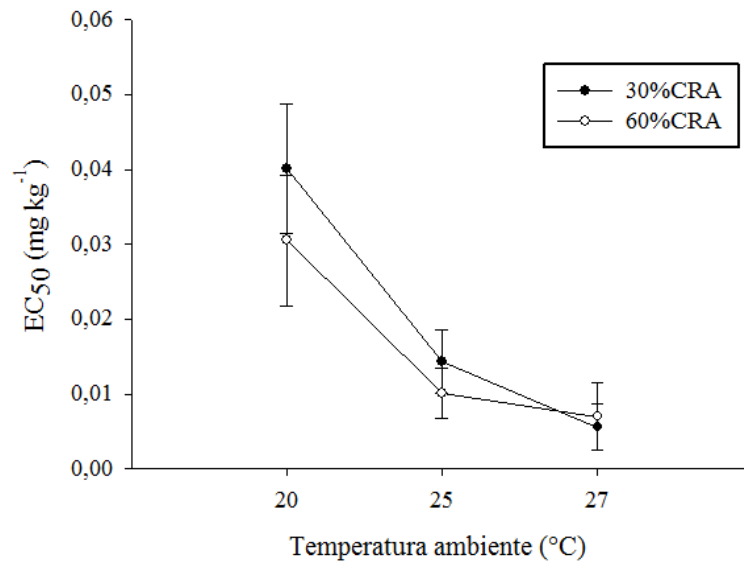
\* Indica que os dados não permitiram estimar os intervalos de confiança de 95%;

<sup>a</sup> Letras minúsculas diferentes denotam diferença significativa entre os valores de CE<sub>50</sub> para diferentes umidades (30 vs 60% CRA), dentro de cada temperatura;

<sup>A, B, C</sup> Letras maiúsculas diferentes denotam diferença significativa entre os valores de CE<sub>50</sub> para diferentes temperaturas (20 vs 25 vs 27 °C), para uma mesma umidade.

A ANOVA fatorial demonstrou que os fatores isoladamente (concentração, temperatura e umidade) exercem influência sobre a reprodução de *F. candida* e que há interação significativa ( $p < 0,05$ ) entre: a) concentração de clotianidina e temperatura; b) concentração e umidade; c) temperatura e umidade; e d) entre concentração, umidade e temperatura, sobre o mesmo parâmetro avaliado (Tabela 3).

Figura 2 – Valores de  $CE_{50}$  (intervalos de confiança de  $\pm 95\%$ ) estimados a partir de testes de toxicidade crônica realizados com *Folsomia candida* em neossolo, a 20, 25 e 27 °C.



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Tabela 3 – Resumo da ANOVA fatorial sobre os efeitos da concentração da clotianidina em neossolo, sob dois diferentes teores de umidade de solo (30 e 60% da capacidade de retenção de água no solo – CRA) e temperaturas (20, 25 e 27 °C), na reprodução de *Folsomia candida*.

Fator	SQ	gl	QM	F	p
Concentração	2162457	1	2162457	569,0753	0,000000
Temperatura	944808	5	188962	49,7274	0,000000
Umidade	995526	2	497763	130,9920	0,000000
Concentração × Temperatura	157468	1	157468	41,4394	0,000000
Concentração × Umidade	527491	10	52749	13,8815	0,000000
Temperatura × Umidade	160307	5	32061	8,4373	0,000001
Concentração × Temperatura × Umidade	56000	2	28000	7,3685	0,000909
Erro	136311	10	13631	3,5872	0,000294

Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Nota: SQ: soma dos quadrados

gl: graus de liberdade

QM: quadrado médio

### 3.3 RISCO AMBIENTAL

Os valores de RTE indicaram que houve risco significativo em todos os cenários testados, independente da temperatura ou da umidade. Contudo, houve uma tendência de decréscimo dos valores de RTE com o aumento da temperatura, indicando um risco ainda maior nas maiores temperaturas (Tabela 4).

Tabela 4 – Valores de Razão Toxicidade-Exposição (RTE) calculados para a exposição de *Folsomia candida* às concentrações previstas no ambiente de clotianidina, após 28 dias do plantio de sementes de milho, em neossolo.

Temperatura	20 °C		25 °C		27 °C	
	30% CRA	60% CRA	30% CRA	60% CRA	30% CRA	60% CRA
Teor de Umidade						
CAE	0,0352	0,0352	0,0326	0,0326	0,0314	0,0314
<b>RTE</b>	0,6392 <sup>a</sup>	0,4517 <sup>a</sup>	0,1933 <sup>a</sup>	0,1166 <sup>a</sup>	0,0446 <sup>a</sup>	0,0414 <sup>a</sup>

Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

<sup>a</sup> Valores de RTE < 5 indicam risco significativo da clotianidina para colêmbolos *F. candida*.

#### 4 DISCUSSÃO

A ANOVA fatorial indicou um efeito significativo da umidade (isoladamente) e também interação significativa deste com os demais fatores, no entanto, somente foi observada uma diferença nos valores de CENO e CEO para as duas umidades sob a temperatura de 27 °C, mas que não foi confirmada pelos valores de CE<sub>10</sub> e CE<sub>50</sub> (Tabela 2). Deste modo, neste estudo não foi possível ter clareza sobre a influência da umidade do solo na toxicidade da clotianidina.

Por outro lado, o número de juvenis encontrados nos tratamentos controle para a menor umidade (30% da CRA) diminuiu significativamente com o aumento da temperatura (Figura 1). De acordo com alguns autores, em situações de redução da umidade do solo, a locomoção dos organismos fica limitada, fazendo com que a reprodução não ocorra e, em alguns casos, pode ocasionar até mesmo a morte (TESTERINK, 1983; BAUER; CHRISTIAN, 1993; CHOI *et al.*, 2006), corroborando com os resultados encontrados em Neossolo sob 30% da CRA. Para que haja uma reprodução efetiva desta espécie de colêmbolos, deve existir uma condição de umidade do solo entre 53 e 74% da CRA (VAN GESTEL; VAN DIEPEN, 1997; CROUAU; CHENON; GISCLARD, 1999; BANDOW *et al.*, 2014b). Deste modo, uma menor umidade encontrada no solo inibe a reprodução de *F. candida*, o que pode representar, em termos ecológicos, uma diminuição na população de colêmbolos em um cenário de seca (TESTERINK, 1983; BANDOW *et al.*, 2014a; BANDOW *et al.*, 2014b). Barmantlo *et al.* (2016) observaram uma redução maior no número de organismos juvenis de enquitreídeos (*Enchytraeus crypticus*) em virtude de uma menor umidade do solo (30% da CRA) contaminado com metais pesados, independente da temperatura. Hennig *et al.* (2020), apesar de verificar efeitos significativos da umidade na toxicidade de imidacloprido (neonicotinoide) para colêmbolos (*F. candida*) sob uma temperatura de 20 (± 2) °C em solo artificial e em um Latossolo brasileiro, também observaram que, em neossolo, a umidade também não exerceu influência significativa na

toxicidade de imidacloprido para colêmbolos, corroborando nas nossas descobertas de que a umidade pode não exercer influência significativa na toxicidade da clotianidina.

Com o aumento da temperatura, o número de juvenis reduziu significativamente nos tratamentos controle (Figura 1). Uma possível explicação para esta diminuição está associada à temperatura ótima para a reprodução dos colêmbolos da espécie *F. candida*, estando próxima a 21 °C (LIMA *et al.*, 2015). Desta forma, temperaturas acima de 28 °C podem comprometer a incubação dos ovos desta espécie, sendo que 30 °C é o limite de sobrevivência para estes organismos (FOUNTAIN; HOPKING, 2005; DE BOER *ET AL.*, 2010). Assim, pode-se subentender que a temperatura de 27 °C, utilizada neste teste, está muito próxima ao limite de sobrevivência de *F. candida* e que quando esta temperatura é extrapolada, pode ocorrer um aumento do estresse associado à temperatura.

De um modo geral, nos resultados encontrados neste trabalho, houve um aumento na toxicidade da clotianidina para colêmbolos *F. candida*, tanto em 30, quanto em 60% da CRA, com o aumento da temperatura, comprovando nossa primeira hipótese. A sobrevivência dos colêmbolos foi afetada em condições de temperaturas mais elevadas, o que indica que um estresse térmico é causado pela exposição a temperaturas acima da faixa ideal para a espécie e pode provocar a morte dos colêmbolos. Desta forma, é provável que os organismos utilizem mais energia para suprir o aumento das taxas metabólicas, diminuindo sua reprodução e crescimento, concentrando seus recursos em processos que garantam a sua sobrevivência. (BLOCK *et al.*, 1994; DE SILVA; PATHIRATNE; VAN GESTEL, 2009; DAI *et al.*, 2019; BANDEIRA *et al.*, 2020). Outros autores, como De Silva, Pathiratne e Van Gestel (2009), Bandow *et al.* (2014a), Jegede, Owojori e Römbke (2017) e Bandeira *et al.*, (2020), também observaram o efeito de aumento da toxicidade com o aumento da temperatura para as moléculas deltametrina, clorpirifós, dimetoato, lambda-cialotrina e imidacloprido, mesmo que para outros organismos e outros solos, sendo que todos autores mencionados afirmam que os efeitos podem estar relacionados a uma desregulação metabólica provocada por esta mudança ambiental.

Ainda, apesar do número de juvenis encontrados sob a temperatura de 27 °C não atender ao critério de validação do teste (>100), é importante ressaltar que esses critérios foram estabelecidos para solo artificial – com características distintas do neossolo (solo natural) -, para a temperatura padrão de 20 °C, e umidade entre 40% a 60% da CRA do solo (ISO 11267, 2014). Deste modo, seria esperado que ocorresse uma alteração na taxa de reprodução e no ciclo de vida dos colêmbolos.

De acordo com Bandeira *et al.* (2021), os colêmbolos foram os organismos mais sensíveis aos efeitos da clotianidina em seus ensaios com um maior número de espécies edáficas. Isso pode estar relacionado ao modo de ação da molécula, que atua como agonista nos receptores nicotínicos de acetilcolina (nAChRs) no sistema nervoso central dos insetos, provocando superexcitação, resultando em paralisia e morte dos organismos expostos (GOULSON, 2013; JESCHKE *et al.*, 2011). Outros autores também já relataram toxicidade da clotianidina para colêmbolos da espécie *F. candida*. Ritchie *et al.* (2019), ao utilizarem um solo natural franco arenoso e uma temperatura de 20 °C, encontraram um CE<sub>50</sub> de 0,069 mg kg<sup>-1</sup>. De Lima e Silva *et al.* (2019) testaram uma formulação pura de clotianidina em solo natural LUFA 2.2, temperatura de 20 °C e teor de umidade do solo de 50% e obtiveram CE<sub>50</sub> de 0,05 mg kg<sup>-1</sup>. Bandeira *et al.* (2021) utilizaram em seus testes, o solo padrão (SAT), umidade do solo de 60% da CRA e temperatura de 20 °C e obtiveram uma toxicidade de CE<sub>50</sub> = 0,15 mg kg<sup>-1</sup>. Em nosso estudo, os valores encontrados para todas as temperaturas e umidades foram inferiores aos encontrados pelos referidos autores, indicando que a toxicidade encontrada neste trabalho foi ainda maior. Isso provavelmente pode ser explicado pelas diferenças nas propriedades dos solos utilizados nos ensaios. Em nossos testes, o solo utilizado (neossolo) é um solo predominantemente arenoso, que possui baixa CTC e baixa capacidade de retenção de poluentes, o que provavelmente propiciou que uma maior quantidade de clotianidina estivesse biodisponível para os colêmbolos na solução do solo, resultando em uma maior toxicidade neste solo em comparação com os outros solos utilizados (SEGAT *et al.*, 2015).

De acordo com os dados encontrados na literatura, os valores de CAE estimados para os cálculos de risco (0,0314 a 0,0352 mg kg<sup>-1</sup>; Tabela 4) estão dentro da faixa de concentrações que já foram encontradas em solos agrícolas, indicando que a estimativa é realista. Por exemplo, Limay-Rios *et al.* (2016) coletaram amostras de solo nos primeiros 5 cm, nos anos de 2013 e 2014, em uma lavoura de milho e detectaram concentrações de clotianidina de 0,00261 (±0,000584) mg kg<sup>-1</sup> e 0,00425 (±0,000830) mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente. De Perre *et al.* (2015), encontraram concentrações residuais de clotianidina de 0,002 mg kg<sup>-1</sup> no solo de uma plantação de milho aproximadamente 300 dias após o plantio de sementes tratadas com o mesmo i.a. Ramasubramanian (2013) encontraram concentrações de clotianidina de 0,031 (±0,003) e 0,063 (±0,003) mg kg<sup>-1</sup> no solo, 60 dias após a aplicação através de pulverização de cana-de-açúcar nas doses de 50 e 100 g ia ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Zhang *et al.* (2017) determinaram resíduos máximos de clotianidina em solo de arrozal irrigado, encontrando 0,14 (± 0,021) mg kg<sup>-1</sup>. Chowdhury *et al.* (2012)



detectaram níveis de  $0,25 (\pm 0,06)$  mg kg<sup>-1</sup> após aplicação de 30 g de i.a h<sup>-1</sup> e  $0,45 \pm 0,09$  mg kg<sup>-1</sup> após aplicação de 60 g i.a. ha<sup>-1</sup>. Ainda, Guillemot *et al* (2019) encontraram concentrações médias em campos cultivados convencionais de 2,72 mg kg<sup>-1</sup> de clotianidina. Neste caso, se este nível de contaminação ocorresse em neossolo, a reprodução da espécie *F. candida* seria totalmente inibida e, mesmo considerando os valores mínimos de clotianidina apresentada pelos autores citados acima, para neossolo, nas temperaturas mais elevadas (25 e 27 °C) e em ambas condições de umidade (30 e 60% da CRA), é esperado que haja risco ambiental da clotianidina para os colêmbolos. Assim, as descobertas deste estudo são um tanto quanto preocupantes, pois foi considerada apenas uma aplicação do inseticida na lavoura e, em muitos casos, esses valores podem ser ainda maiores, quando as aplicações se repetem.

Por meio da estimativa da RTE, verificou-se que risco ambiental da clotianidina para *F. candida* pode ser ainda maior com o aumento da temperatura atmosférica (25 e 27 °C) (Tabela 4), quando comparado a temperatura padrão, indicando que cenários de mudanças climáticas são alarmantes e devem ser considerados nas avaliações de risco ambiental dos agrotóxicos. Ainda, Bandeira *et al.*, (2021) estimaram, via curva de sensibilidade das espécies (SSDs) que o risco da clotianidina, após uma aplicação de uma formulação comercial (Titan™) diretamente no solo é significativo para invertebrados não-alvos do solo, dentre eles os colêmbolos *F. candida*.

Apesar de o Brasil não possuir uma avaliação de risco ambiental de agrotóxicos para organismos do solo, com base no regulamento vigente na Europa (nº 1488/94 da Comissão Europeia), os resultados aqui obtidos indicariam que estudos mais aprofundados devem ser realizados (EC, 2003; EFSA, 2017). Assim, os resultados encontrados neste trabalho servem como um alerta, indicando que as mudanças climáticas, mais especificamente o aumento da temperatura atmosférica, afetarão principalmente a reprodução e o metabolismo dos colêmbolos *F. candida*, bem como colocar em risco esta espécie de invertebrados do solo, podendo representar uma alteração no equilíbrio do solo, pois estes atuam na ciclagem de materiais, no desenvolvimento e na formação de microagregados, bem como na manutenção das comunidades biológicas e na melhoria das propriedades físicas e químicas do solo (JIANXIU, 2007).

## 5 CONCLUSÕES

A toxicidade da clotianidina aumentou com o aumento da temperatura. No entanto, a influência da umidade do solo na toxicidade da clotianidina não foi clara, com base nos

valores de CE<sub>50</sub>. Em geral, a redução da umidade causou redução na reprodução dos colêmbolos. Os valores de RTE indicaram que houve risco significativo em todos os cenários testados, independentemente da temperatura ou da umidade avaliados, havendo um aumento do risco com o aumento da temperatura.

Os resultados obtidos neste trabalho demonstram a importância de se considerar condições próximas à realidade, como o aumento da temperatura atmosférica e redução na umidade do solo decorrentes dos cenários de mudanças climáticas previstos para este século, bem como a utilização de um solo natural para ensaios ecotoxicológicos.

## REFERÊNCIAS

- ALVES, P. R. L.; CARDOSO, E. J. B. N. Overview of the Standard Methods for Soil Ecotoxicology Testing. *In*: LARRAMENDY, M. L. **Invertebrates - Experimental Models in Toxicity Screening**, 2016.
- ALFORD, A.; KRUPKE, C. H. Translocation of the neonicotinoid seed treatment clothianidin in maize. **PLOS ONE**, v. 12, n. 3, p. 1–19, 2017.
- BANDEIRA, F.O. *et al.* Effect of temperature on the toxicity of imidacloprid to *Eisenia andrei* and *Folsomia candida* in tropical soils. **Environmental Pollution**, v. 267, 2020.
- BANDEIRA, F. O. *et al.* Chronic effects of clothianidin to non-target soil invertebrates: Ecological risk assessment using the species sensitivity distribution (SSD) approach. **Journal of Hazardous Materials**, v. 419, 2021.
- BANDOW, C. *et al.* Interactive effects of lambda-cyhalothrin, soil moisture, and temperature on *Folsomia candida* and *Sinella curviseta* (Collembola). **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 33, n. 3, p. 654–661, 2014a.
- BANDOW, C.; KARAU, N.; RÖMBKE, J. Interactive effects of pyrimethanil, soil moisture and temperature on *Folsomia candida* and *Sinella curviseta* (Collembola). **Applied Soil Ecology**, v. 81, p. 22–29, 2014b.
- BARMENTLO, S. H. *et al.* Influence of climate change on the multi-generation toxicity to *Enchytraeus crypticus* of soils polluted by metal/metalloid mining wastes. **Environmental Pollution**, v. 222, p. 101–108, 2016.
- BASS, C.; FIELD, L. M. Neonicotinoids. **Current Biology**, v. 28, n. 14, p. R772–R773, 2018.
- BAUER, R.; CHRISTIAN, E. Adaptations of three springtail species to granite boulder habitats (Collembola). **Pedobiologia**, v. 37, n. 5, p. 280–290, 1993.

BLOCK, W. *et al.* Thermal Adaptation in the Arctic Collembolan *Onychiurus arcticus* (Tullberg). **Journal of insect physiology**, v. 40, n. 8, 1994.

CHOI, W. IL *et al.* A modeling study of soil temperature and moisture effects on population dynamics of *Paronychiurus kimi* (Collembola: Onychiuridae). **Biology and Fertility of Soils**, v. 43, n. 1, p. 69–75, 2006.

CHOWDHURY, S.; MUKHOPADHYAY, S.; BHATTACHARYYA, A. Degradation dynamics of the insecticide: Clothianidin (dantop 50 % WDG) in a tea field ecosystem. **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 89, n. 2, p. 340–343, 2012.

COCK, M. J. W. *et al.* The implications of climate change for positive contributions of invertebrates to world agriculture. **CAB Reviews**, v. 8, n. 028, 2013.

CROUAU, Y.; CHENON, P.; GISCLARD, C. The use of *Folsomia candida* (Collembola, Isotomidae) for the bioassay of xenobiotic substances and soil pollutants. **Applied Soil Ecology**, v. 12, n. 2, p. 103–111, 1999.

DAI, A. Increasing drought under global warming in observations and models. *Nature Climate Change*, v. 3, n. 1, p. 52–58, 2013.

DAI, W. *et al.* Synergistic interaction between effects of phenanthrene and dynamic heat stress cycles in a soil arthropod. **Environmental Pollution**, v. 254, p. 113071, 2019.

DAUFRESNE, M.; LENGFELLNER, K.; SOMMER, U. Global warming benefits the small. *PNAS*, v. 106, n. 31, 2009.

DE BOER, T. E. *et al.* The effect of soil pH and temperature on *Folsomia candida* transcriptional regulation. **Journal of Insect Physiology**, v. 56, n. 4, p. 350–355, 2010.

DE LIMA E SILVA, C. *et al.* Toxicity in Neonicotinoids to *Folsima candida* and *Eisenia andrei*. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 39, n. 3, p. 548–555, 2019.

DE PERRE, C.; MURPHY, T. M.; LYDY, M. J. Fate and effects of clothianidin in fields using conservation practices. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 34, n. 2, p. 258–265, 2014.

DE SILVA, P. M. C. S.; PATHIRATNE, A.; VAN GESTEL, C. A. M. Influence of temperature and soil type on the toxicity of three pesticides to *Eisenia andrei*. *Chemosphere*, v. 76, n. 10, p. 1410–1415, 2009.

DUPUTIÉ *et al.* Phenological plasticity will not help all species adapt to climate change. **Global Change Biology**, v.21, p. 3062–3073, 2015.

EC, 2003. Technical guidance document on risk assessment. In: Support of Commission Directive 93/67/EEC. Commission Regulation (EC) No 1488/94 and Directive 98/8/EC. European Commission Joint Research Center.

EFSA (**European Food Safety Authority**), 2017. Panel on plant protection products and their residues (PPR). Scientific opinion addressing the state of the science on risk assessment of plant protection products for in-soil organisms. *EFSA J.* 15, 4690.

ENVIRONMENTAL CANADA. Guidance Document on Statistical Methods for Environmental Toxicity Test. Environmental Protection Series, EPS 1/RM/46, 2005 with 2007 updates. **Ottawa: Environment Canada**, 2007.

FOUNTAIN, M. T.; HOPKIN, S. P. *Folsomia candida* (Collembola): A “standard” soil arthropod. **Annual Review of Entomology**, v. 50, p. 201–222, 2005.

FRANKS, S. J.; HOFFMANN, A. A. Genetics of Climate Change Adaptation. **Annual Review of Genetics**, v. 46, p. 185–208, 2012.

GONZÁLEZ-ALCARAZ, M. N., & VAN GESTEL, C. A. M. Toxicity of a metal (loid)-polluted agricultural soil to *Enchytraeus crypticus* changes under a global warming perspective: Variations in air temperature and soil moisture content. **Science of the Total Environment**, vol. 573, p. 203–211, 2016.

GUILLEMINOT, S. H. *et al.* A nation - wide survey of neonicotinoid insecticides in agricultural land with implications for agri - environment schemes. **Journal of Applied Ecology**, vol. 56, p. 1502–1514, 2019.

GUNDERSON, A. R.; STILLMAN, J. H. Plasticity in thermal tolerance has limited potential to buffer ectotherms from global warming. **Proceedings B**, 2015.

GOULSON, D. An overview of the environmental risks posed by neonicotinoid insecticides. **Journal of Applied Ecology**, v. 50, n. 4, p. 977–987, 2013.

HACKENBERGER, D. K. *et al.* Influence of soil temperature and moisture on biochemical biomarkers in earthworm and microbial activity after exposure to propiconazole and chlorantraniliprole. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 148, p. 480–489, 2018.

HENNIG, T. B. *et al.* Toxicity of imidacloprid to collembolans in two tropical soils under different soil moisture. **Journal of Environmental Quality**, p. 1–11, 2020.

IBAMA. **Relatórios de comercialização de agrotóxicos**. 2016. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/agrotoxicos/relatorios-de-comercializacao-de-agrotoxicos>. Acesso em: 26 jul. 2021.

IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

ISO, 2014. **International Standardization Organization** – 11267. Soil quality - Inhibition of reproduction of Collembola (*Folsomia candida*) by soil contaminants. Genève, Switzerland.

JEGEDE, O. O.; OWOJORI, O. J.; RÖMBKE, J. Temperature influences the toxicity of deltamethrin, chlorpyrifos and dimethoate to the predatory mite *Hypoaspis aculeifer* (Acari) and the springtail *Folsomia candida* (Collembola). **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 140, n. February, p. 214–221, 2017.

JESCHKE, P. *et al.* Overview of the status and global strategy for neonicotinoids. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 59, n. 7, p. 2897–2908, 2011.

JIANXIU, C. Roles of springtails in soil ecosystem. **Biodiversity Science**, v. 15, n. 2, p. 154, 2007.

LIMA, M. P. R. *et al.* Carbaryl toxicity prediction to soil organisms under high and low temperature regimes. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 114, p. 263–272, 2015.

LIMAY-RIOS, V. *et al.* Neonicotinoid insecticide residues in soil dust and associated parent soil in fields with a history of seed treatment use on crops in southwestern Ontario. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 35, n. 2, p. 303–310, 2016.

MEESTER, L. DE; STOKS, R.; BRANS, K. I. Genetic adaptation as a biological buffer against climate change: potential and limitations. **Integrative Zoology**, v.13, p. 1–41, 2018.

NATAL-DA-LUZ, T. *et al.* Toxicity to *Eisenia andrei* and *Folsomia candida* of a metal mixture applied to soil directly or via an organic matrix. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 74, n. 6, p. 1715–1720, 2011.

NIVA, C. C. *et al.* Soil ecotoxicology in Brazil is taking its course. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 23, n. 11, p. 11363–11378, 2016.

PRATHER, C. M. *et al.* Invertebrates, ecosystem services and climate change. **Biological Reviews**, v. 88, n.2, p. 327–348, 2013.

RAMASUBRAMANIAN, T. Persistence and Dissipation Kinetics of Clothianidin in the Soil of Tropical Sugarcane Ecosystem. **Water Air Soil Pollut.** v. 224. n. 3. p. 1–5, 2013.

RITCHIE, E. E. *et al.* Lethal and Sublethal Toxicity of Thiamethoxam and Clothianidin Commercial Formulations to Soil Invertebrates in a Natural Soil. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 38, n. 10, p. 2111–2120, 2019.

SEGAT, J. C. *et al.* Ecotoxicological evaluation of swine manure disposal on tropical soils in Brazil. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 122, p. 91–97, 2015.

SIEPIELSKI, A. M. *et al.* Precipitation drives global variation in natural selection. **Science**, p. 959–962, 2017.

SUR, R.; STORK, A. Uptake, translocation and metabolism of imidacloprid in plants. **Bulletin of Insectology**, v. 56, n. 1, p. 35–40, 2003.

TESTERINK, G. J. Metabolic Adaptations to Seasonal Changes in Humidity and Temperature in Litter-Inhabiting Collembola. **Oikos**, v. 40, n. 2, p. 234, 1983.

VAN GESTEL, C. A. M.; VAN DIEPEN, A. M. F. The influence of soil moisture content on the bioavailability and toxicity of cadmium for *Folsomia candida* Willem (Collembola: Isotomidae). **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 36, n. 2, p. 123–132, 1997.

VELKI, M.; EČIMOVIĆ, S. Changes in exposure temperature lead to changes in pesticide toxicity to earthworms: A preliminary study. **Environmental Toxicology and Pharmacology**, v. 40, n. 3, p. 774–784, 2015.

ZHANG, Z. Y. *et al.* Validation of analytical method and evaluation of clothianidin residues in rice in a typical Chinese field ecosystem. **Journal of Agricultural Science**, v. 155, n.9, p. 1371-1380, 2017.