

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

Densidade populacional e área de amostragem para a broca-do-café, *Hypothenemus hampei* (Ferrari), por meio de armadilhas com semioquímicos

Fernando Zanotti Madalon

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em Ciências. Área de concentração: Entomologia

**Piracicaba
2024**

Fernando Zanotti Madalon
Engenheiro Agrônomo

**Densidade populacional e área de amostragem para a broca-do-café,
Hypothenemus hampei (Ferrari), por meio de armadilhas com semioquímicos**

versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **JOSÉ MAURÍCIO SIMÕES BENTO**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor
em Ciências. Área de concentração: Entomologia

Piracicaba
2024

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP**

Madalon, Fernando Zanotti

Densidade populacional e área de amostragem para a broca-do-café, *Hypothenemus hampei* (Ferrari), por meio de armadilhas com semioquímicos /Fernando Zanotti Madalon.- - versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011

Piracicaba, 2024.

82 p.

Tese (Doutorado) - - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

1. Scolytinae 2. MIP 3. Insetos marcados 4. Poeira fluorescente 5. Semioquímicos I. Título

DEDICATÓRIA

*Agradeço a Deus pela graça da vida.
Aos meus avós paternos, José Madalon Neto (in memorian) e Julha Oliveira Madalon (in
memorian), e Maternos Geraldo Acilino Zanotti e Zilda Rocon Zanotti.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, que me agraciou com o dom da vida, sempre me iluminou nos momentos de dificuldade e me proporcionou forças.

Aos meus pais, Geraldo Madalon e Solange Dolacir Zanotti Madalon, por todo amor e apoio. Obrigado por me educarem e me colocarem no caminho de ser um bom homem.

Ao Prof. Dr. José Maurício Simões Bento, pelos conselhos e orientação. Obrigado por me orientar rumo a ser um profissional e ser humano melhor.

Ao Dr. Weliton Dias da Silva, por toda a ajuda, rigor científico e ensinamentos. Obrigado pelo empenho e conselhos, é admirável como ama o que faz.

Ao Dr. Adriano Garcia, por toda a ajuda no desenvolvimento no modelo usado neste trabalho.

Ao Dr. José Romário de Carvalho, por toda a ajuda.

Ao Dr. Dirceu Pratissoli, por todo seu apoio e profissionalismo.

À minha noiva Abigail, por seu empenho, carinho e dedicação.

Ao meu irmão Rodrigo, cunhada Bertha e sobrinha Esther por conselhos, pelas críticas construtivas e estímulo.

A família que me adotou como membro, me concedendo a graça de ser Padrinho da Sara. Agradeço imensamente Emíliana, Weliton e Laura.

Aos amigos e colegas de laboratório e Departamento de Entomologia: Kamila Azevedo, Felipe Chagas, Maysa Tomé, Fernando Sujimoto, Franciele, Hugo, Arodí, Amanda, Marvin, Paolo, Mateus Tonelli, Felipe G., Karla, Matheus Narazaki, Rafaela, Diego Magalhães, Diego Bastos, Thalita, Isabella Bueno e Flavia.

Ao Departamento de Entomologia e Acarologia e seus profissionais que não mediram esforços em minha formação.

A todos os meus familiares.

A Fundação de Amparo a Pesquisa do estado de São Paulo (FAPESP), (2019/20179-1), pelo auxílio financeiro e apoio científico.

Ao CNPq pela ajuda financeira.

EPÍGRAFE

*Prepara-se o cavalo para o dia da batalha, mas o Senhor é que dá
a vitória.
(Provérbios 21:31)*

SUMÁRIO

RESUMO.....	9
ABSTRACT	10
LISTA DE FIGURAS.....	11
LISTA DE TABELA.....	13
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	14
1. INTRODUÇÃO.....	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1 Importância de <i>Hypothenemus hampei</i> na cafeicultura	21
2.2 Bioecologia de <i>Hypothenemus hampei</i>	22
2.3 Ecologia química de <i>Hypothenemus hampei</i>	23
2.4 Armadilhas e o monitoramento de <i>Hypothenemus hampei</i>	24
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	27
3.1 Local de execução do projeto	27
3.2 Triagem e identificação dos insetos capturados.....	27
3.3 Teste de seleção de modelos de armadilhas para <i>Hypothenemus hampei</i>	27
3.4 Determinação do raio de ação da armadilha e estimativa da densidade populacional absoluta de <i>Hypothenemus hampei</i> a partir de dados de armadilhas	29
3.5 Determinação do nível de dano econômico com o novo modelo de armadilha	32
3.6 Desenvolvimento do modelo relação entre a taxa intrínseca de aumento natural (r) e a temperatura	33
3.7 Análises estatísticas.....	35
4. RESULTADOS.....	39
4.1 Teste de seleção de modelos de armadilhas para <i>Hypothenemus hampei</i>	39
4.2 Determinação do raio de ação da armadilha e estimativa da densidade populacional absoluta de <i>Hypothenemus hampei</i> a partir de dados de armadilhas	40
4.3 Determinação do nível de dano econômico com o novo modelo de armadilha	43
4.4 Desenvolvimento do modelo de relação entre a taxa intrínseca de aumento natural (r) e a temperatura	46
5. DISCUSSÃO.....	53
5.1 Teste de seleção de modelos de armadilhas, determinação do raio de ação da armadilha e estimativa da densidade populacional absoluta de <i>Hypothenemus hampei</i> a partir de dados de armadilhas.....	53
5.2 Determinação do nível de dano econômico e desenvolvimento do modelo de relação entre a taxa intrínseca de aumento natural (r) e a temperatura.....	57
6. CONCLUSÕES.....	61
REFERÊNCIAS	63
APÊNDICES.....	79

RESUMO

Densidade populacional e área de amostragem para a broca-do-café, *Hypothenemus hampei* (Ferrari), por meio de armadilhas com semioquímicos

Armadilhas contendo álcool tem sido utilizada para monitorar a broca-do-café, *Hypothenemus hampei* (Ferrari), uma das pragas mais destrutivas do café. No entanto, nenhum estudo foi dedicado a mensurar a área de amostragem efetiva dessas armadilhas, a interpretar os dados obtidos para levantamento da densidade populacional absoluta, e a testar modelos computacionais que representem a dinâmica espaço-temporal desta praga em fazendas de café. Neste estudo foram conduzidos experimentos de armadilha única e liberação múltipla em cultivo de café arábica. Com base nos resultados, foram correlacionados o número de capturas por área amostrada, que permitiu simular diferentes cenários de época de controle. Adultos de brocas-do-café marcados com pó fluorescente, foram liberados em diferentes distâncias nas quatro direções cardeais de uma armadilha de monitoramento central, contendo metanol e etanol (proporção 1:1). Apenas 2,6% dos insetos liberados foram recapturados, com as recapturas diminuindo significativamente com o aumento das distâncias de liberação. As análises de recaptura revelaram que a praga se move aleatoriamente no campo e se dispersa a no máximo 22,2 m. Apesar da pluma curta da armadilha (1,3 m), a área de amostragem calculada da armadilha foi de 0,17 ha, com uma probabilidade de captura de 0,01. Portanto, a captura de 100 brocas em uma única armadilha ha^{-1} na fase inicial de enchimento dos grãos de café, reflete uma população de 20,2 milhões de brocas ha^{-1} na colheita, resultando em uma perda projetada de grãos de 60,3 kg ha^{-1} . As simulações, realizadas por meio de um modelo computacional, conseguiram prever satisfatoriamente os surtos da praga com base em monitoramento com armadilhas, indicando que o controle na pós-florada e imediatamente antes da maturação são os mais eficientes para manter o nível populacional da praga em menores níveis de infestação. Estas descobertas auxiliam em um melhor uso de armadilhas contendo semioquímicos e a interpretação dos dados de captura para melhorar o manejo da broca-do-café.

Palavras-chave: Scolytinae. MIP. Insetos marcados. Poeira fluorescente. Semioquímicos.

ABSTRACT

Population density and sampling area of the coffee berry borer, *Hypothenemus hampei* (Ferrari), using semiochemicals-based traps

Traps baited with alcohol have long been used to monitor the coffee berry borer, *Hypothenemus hampei* (Ferrari), a highly destructive coffee pest. However, no study has been dedicated to measure the effective sampling area of these traps and translating trap data into absolute population density on coffee farms. Additionally, there is a lack of computational models representing the spatiotemporal dynamics of this pest. We addressed these issues through single-trap and multiple-release experiments in Arabica coffee cultivation. Based on the results of this stage, we correlated the number of captures per sampled area, which allowed us to simulate different control timing scenarios. Coffee berry borers marked with fluorescent powder were released at varying distances in the four cardinal directions from a central monitoring trap baited with methanol and ethanol (1:1 ratio). Only 2.6% of the released insects were recaptured, and recaptures significantly decreased with increasing release distances. Recapture analyses revealed that the pest moves randomly in the field, dispersing up to a maximum of 22.2 meters. Despite the trap's short plume (1.3 meters), the calculated sampling area for the trap was 0.17 hectares, with a capture probability of 0.01. Therefore, capturing 100 coffee borers in a single trap per hectare during the early coffee bean filling stage reflects a population of 20.2 million borers per hectare at harvest, resulting in a projected loss of 60.3 kilograms per hectare. Our simulations with the computational model successfully predicted pest outbreaks based on trap monitoring, showing that control during the post-flowering stage and immediately before maturation are the most effective in maintaining the pest population at lower infestation levels. These findings shed light on improving the use of semiochemical traps and interpreting capture data for integrated coffee berry borer management.

Keywords: Scolytinae. IPM. Marked insects. Fluorescent powder. Semiochemicals.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. (A) Dispositivo difusor de atraentes voláteis; (B) armadilha “lapar”; (C) armadilha “lapar” modificada; (D) armadilha “Multifunil” ou “Lindgren”; (E) armadilha “Aletas duplas cruzadas”; e (F) armadilha “Broca Biocontrole®”.....28
- Figura 2. Fêmeas colonizadoras de *Hypothenemus hampei* marcadas com pó fluorescente (DayGLO Color Corporation, Cleveland, OH, USA).....30
- Figura 3. Croqui do experimento de determinação do raio de ação da armadilha para *Hypothenemus hampei*.....31
- Figura 4. Modelo Gaussiano da taxa intrínseca de aumento natural de *Hypothenemus hampei* em função da temperatura (°C).....33
- Figura 5. Média (\pm EP) do número de adultos de *Hypothenemus hampei* (A) , outros Scolytinae (B), outros Coleoptera (C) e insetos pertencentes a outras ordens (D) capturados em diferentes modelos de armadilhas iscadas com etanol + metanol. Médias seguidas pela mesma letra, em cada quadro, não diferem estatisticamente entre si de acordo com o teste REGWQ ao nível de 5% de probabilidade.....39
- Figura 6. Proporção de recaptura (spT_{fer}) de brocas de café marcadas em diferentes distâncias de liberação de uma armadilha central iscada com etanol-metanol. As variáveis dependentes e independentes foram transformadas logaritmicamente para atender às premissas da regressão linear. A linha sólida representa o modelo de melhor ajuste e a área cinza representa os intervalos de confiança de 95%.....41
- Figura 7. Análises de regressão não linear com dados de experimentos de armadilha única e distância de liberação múltipla com brocas-do-café marcadas. (A) Proporção de recaptura (spT_{fer}) versus distância de liberação (m) de uma armadilha central com isca de álcool; (B) Inverso da proporção de recaptura por distância de liberação; (C) Área do anel $SpT_{fer} \times$ armadilha ao longo da distância de liberação. A linha sólida em cada painel representa o modelo não linear de melhor ajuste.....42
- Figura 8. Perda de massa de grãos *Coffea arabica* em função do nível de infestação de *Hypothenemus hampei*. Modelo linear (A), exponencial (B) e sigmoidal (C).....44
- Figura 9. Nível de dano econômico em *Coffea arabica* em função dos valores recebidos por saca beneficiada de 60 kg e custo de produção por hectare.....45
- Figura 10. Infestação de frutos de café arábica (%) em coleta amostral convencional zig-zag e coleta amostral utilizando de frutos de um ramo inteiro (%) com plano amostral se utilizando da armadilha multifunil, iscada com (Etanol + Metanol (1:1) em diferentes estágios fenológicos do cafeeiro.....46
- Figura 11. Simulação de modelo de dados de campo referente ao número de capturas de fêmeas colonizadoras de *Hypothenemus hampei* em função do tempo. O gráfico de linha compreende a simulação do modelo, que apresenta um erro de ajuste médio quadrático relativo (RREs).....47
- Figura 12. Simulação com aplicação de inseticida com eficiência de controle 80% no florescimento.....48
- Figura 13. Simulação com aplicação de inseticida com eficiência de controle 80% na maturação.....49
- Figura 14. Simulação com aplicação de inseticida com eficiência de controle de 80% na fase de florescimento e maturação.....50
- Figura 15. Simulação com aplicação de inseticida com eficiência de controle de 80% na expansão e maturação.....51

Figura 16. Simulação com aplicação de inseticida com eficiência de controle de 80% no florescimento, expansão e maturação.....52

LISTA DE TABELA

Tabela 1. Estágios fenológicos da produção de café no Brasil e a capacidade de suporte correspondente (número máximo de insetos coletados quinzenalmente em cada estágio fenológico).....	34
Tabela 2. Número médio (\pm EP) de brocas-de-café marcadas liberadas em diferentes distâncias de uma armadilha funil vermelha central de 4 unidades, iscada com etanol e metanol, e porcentagem de recapturas por distância de liberação ao longo do tempo (N = 5 repetições).....	40
Tabela 3. Critério de seleção dos modelos referente à estimativa de perda de massa de grão em função do nível de infestação de <i>Hypothenemus hampei</i>	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

(K)	capacidade de suporte
(r)	taxa intrínseca de aumento natural
°C	grau celsius
A_c	área do círculo
AIC	critério de informação de Akaike
C	eficácia de uma estratégia de controle
cm	centímetro
COP	custo operacional de produção
EF	eficiência de controle
EP	erro padrão
EtOH	etanol
g	grama
ha	hectare
kg	quilograma
L	litro
LogLik	logaritmo de máxima verossimilhança
m	metros
MAG plot	gráfico que demonstra a distância originária do inseto capturado na armadilha no eixo (X) vs. 1/proporção capturada no eixo (Y)
MetOH	metanol
mg	miligrama
Miller plot	gráfico representando o raio de captura no eixo (X) vs. $spT_{fer} \times$ área do anel no eixo (Y)
MIP	manejo integrado de pragas
ml	mililitro
mm	miligrama
NDE	nível de dano econômico
PET	polietileno tereftalato
PVC	policloreto de vinila
r	raio do círculo
R₀	taxa líquida de reprodução
R²	coeficiente de determinação
REGWQ	teste de Ryan-Einot-Gabriel-Welsch Q
RRE	erro médio quadrático relativo

RSS	soma de quadrados residuais
spT_{fer}	proporção de insetos capturados provenientes de uma distância específica da armadilha
T_{fer}	número esperado de insetos capturados após tempo de atividade da armadilha dividido pelo número total insetos dentro da área de amostragem da armadilha
TR₇₅	distância equivalente a 75% do raio de captura
UR	umidade relativa do ar
V	valor do produto
VFloC	voláteis de flores de cafeeiro
VFruC	voláteis de frutos de cafeeiro
β₂	coeficiente angular de ajuste das curvas de perda de massa
π	número Pi

1. INTRODUÇÃO

A broca-do-café, *Hypothenemus hampei* (Ferrari, 1867) (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae), é a principal praga da cafeicultura do mundo, causando prejuízos anuais superiores a 350 milhões de dólares e afetando mais de 20 milhões de famílias dependentes desta atividade (Vega et al. 2003; Oliveira et al. 2013; Vega et al. 2015a). Além disso, o manejo desta praga é difícil, visto que o inseto passa a maior parte de seu ciclo de vida (ovo a adulto) dentro do fruto de café, prejudicando a ação de agentes de mortalidade natural e o emprego de táticas de controle (Vega et al. 2015b; Infante, 2018; Damon, 2000). Na prática, isto significa dizer que o inseto só estará vulnerável no momento da dispersão dos adultos, o qual ocorre em determinadas épocas do ano, sob condições climáticas específicas. Isto é, somente fêmeas de *H. hampei* são responsáveis pela colonização de novos frutos no campo e estas, após a emergência e acasalamentos com machos da mesma prole, são compelidas por estímulos ambientais como luz, umidade relativa e temperatura a abandonar o fruto nativo e colonizar novos frutos (Jaramillo et al. 2010; Silva et al. 2014; Alba-Alejandre et al. 2018).

A estratégia de manejo da broca-do-café pelo método cultural é tida como uma das principais alternativas, na qual se preconiza a realização de uma colheita bem-feita e posterior repasse com a catação dos frutos de café remanescentes (Bergamin, 1944; Bustillo et al. 1998), assim como a poda dos cafeeiros (Dufour et al. 2019), a fim de diminuir o potencial da praga para a próxima safra. Aliado a isso, são recomendados principalmente os métodos de controle químico e microbiano. Apesar da eficácia dos inseticidas endossulfan e clorpirifós no manejo de *H. hampei*, sua comprovada periculosidade a saúde humana e ao ambiente fez com que alguns destes produtos fossem banidos em diversos países, incluindo o Brasil (Souza et al. 2013; Dewi et al. 2019). Ainda que novas moléculas inseticidas com novos sítios de ação tenham sido lançadas para o controle da broca-do-café, a eficiência inferior e o maior custo em relação a seus antecessores parecem limitar a utilização destes produtos pelos cafeicultores. Não obstante, apesar de existirem no mercado diversas formulações a base do fungo *Beauveria bassiana*, seu uso ainda parece ser limitado pelos produtores de café devido as exigências tecnológicas para a sua aplicação ou pela baixa eficiência dos produtos microbianos no campo (Greco et al. 2018, Wraight et al. 2018).

Neste sentido, diversos esforços têm sido empregados no intuito de desenvolver e/ou aperfeiçoar as estratégias de manejo para *H. hampei*, incluindo o uso de armadilhas de auto-inoculação com fungos entomopatogênicos (Mota et al. 2017), utilização de substâncias repelentes (Zorzetti et al. 2012; Santos et al. 2013) e criação e liberação de parasitoides e predadores (Rodríguez et al. 2017; Portilla e Grodowitz, 2018). Apesar de algumas destas estratégias serem consideradas ambientalmente seguras e relativamente

eficientes, elas ainda dependem do emprego de métodos antiquados e onerosos para o monitoramento e estimativa populacional da broca-do-café. Por exemplo, a infestação desta praga em cafezais é estimada, majoritariamente, pela coleta periódica e análise individual de frutos, o que, além de oneroso, é destrutivo para a lavoura (Fernandes et al. 2014; Fernandes et al. 2015). Não obstante, esta avaliação visual dos frutos implica que os insetos já teriam atingido os frutos, o que significaria que os danos já estão presentes na cultura. Dessa maneira, não há a indicação do momento de maior vulnerabilidade da broca, que é na revoada ocorrida imediatamente anterior a infestação. Ademais, em épocas de escassez de frutos, mas sob condições climáticas favoráveis, as revoadas também podem ocorrer. Portanto, a utilização de uma adequada estratégia para detectar o momento de trânsito da broca no campo é de suma importância para que um manejo mais eficiente seja empregado para esta praga.

Diversos estudos têm visado o emprego de armadilhas de semioquímicos para o monitoramento e manejo populacional de *H. hampei*. Apesar da identificação e comprovação em laboratório de que a espécie é atraída por determinados voláteis de frutos de café (Jaramillo et al. 2013; Walker et al. 2019), o emprego destas substâncias no campo é pouco expressivo, sendo que na prática ainda são utilizadas armadilhas iscadas basicamente com etanol e metanol (Mendoza-Mora, 1991; Infante, 2018). Embora estes álcoois sejam liberados pelos frutos de café (Agresti et al. 2008), eles não são específicos para broca, de forma que outras espécies de insetos, notavelmente coleópteros da mesma subfamília desta praga, podem ser atraídos por eles (Ranger et al. 2018; Ranger et al. 2019). Isto se torna preocupante uma vez que, no processo de amostragem de *H. hampei*, a presença de outros escolitíneos ou de insetos de semelhante aparência nas armadilhas podem levar a superestimação populacional da praga e, por consequência, a tomada de decisão precipitada no emprego das táticas de manejo. Johnson et al. (2018) demonstraram que a porcentagem de outros escolitíneos capturados com armadilhas etanólicas em cafezais do Havaí é relativamente alta e este índice deveria ser considerado como fator de correção para a estimativa populacional da broca-do-café. Na prática, a confusão taxonômica ocorre devido à dificuldade na separação visual das várias espécies de escolitíneos coletadas nas atuais armadilhas utilizadas.

Aliado a este fato, existem discordâncias entre os trabalhos quanto a proporção de armadilhas que deveriam ser utilizadas por área. Por exemplo, Aristizábal et al. (2015) têm proposto a utilização de 10 armadilhas/ha, enquanto Fernandes et al. (2014) propuseram 30 armadilhas/ha. Contudo, deve ser considerado que estes trabalhos utilizaram diferentes modelos de armadilhas e recipientes difusores, o que não permite extrapolar estes resultados para as diferentes regiões cafeeiras do mundo. Na Colômbia e Havaí são utilizadas armadilhas com aletas do modelo 'brocatrap' (Dufour, 2002; Messing, 2012). No

Brasil, as armadilhas mais utilizadas são construídas artesanalmente com garrafas de polietileno tereftalato (PET), idealizadas pelo Instituto Agrônomo do Paraná e denominadas como modelo 'lapar' (Villacorta et al. 2001). Esta armadilha consiste em uma garrafa PET de dois litros com uma janela de 20 × 15 cm aberta na região central da armadilha. Um frasco difusor contendo etanol e metanol é fixado internamente na região central da janela e o fundo da armadilha é preenchido com solução de água e detergente.

Uma característica comum entre os atuais modelos de armadilhas é a presença de uma grande área útil de captura que acaba sendo desfavorável, pois permite a entrada de insetos não-alvo (parasitoides, predadores e polinizadores) de diversos tamanhos, assim como folhas e ramos, que acabam dificultando a triagem do material coletado (Uemura-Lima et al. 2010; Johnson et al. 2018). Ademais, todas elas dependem da colocação de algum líquido mortífero no seu interior, o que exige a substituição periódica a fim de evitar a destruição dos insetos por putrefação. Outra dificuldade importante diz respeito aos dispositivos de liberação dos atraentes, que muitas vezes são confeccionados com frascos de tamanhos, formatos e materiais inadequados que não propiciam um controle preciso da taxa de liberação dos compostos ou exigem sua troca ou reposição em curto espaço de tempo.

Por fim, é de extrema importância salientar que ainda não existe um consenso quanto a relação entre as capturas da broca nas armadilhas e os danos causados na cultura. Por exemplo, Fernandes et al. (2014), visando o controle massal da broca-do-café, demonstraram que na proporção de 30 armadilhas/ha a porcentagem de redução de frutos brocados é de 57%, e que apesar desta redução, o nível de dano em frutos de café é de cerca de 10%. Dufor e Frérot (2008), por sua vez, verificaram que para o mesmo propósito, a utilização de 44 armadilhas/ha seria o ideal, entretanto, devido à alta demanda de material consumido, optaram pela recomendação de 22 armadilhas/ha. Vale ressaltar que, nestes trabalhos, os níveis de infestação observados sempre foram superiores ao nível de controle (3 a 5%) adotado pelos cafeicultores (Souza et al. 2013).

Para fins de monitoramento, Pereira et al. (2012) utilizaram 20 armadilhas/ha, e mesmo não obtendo nenhuma captura de *H. hampei* o nível de frutos brocados foi de 15%. Já Fernandes et al. (2015) propuseram a utilização de ~ 2 armadilhas/ha, todavia, este número por área baseou-se unicamente na distribuição de frequência dos dados de captura de insetos, não levando em consideração a distribuição espacial real do inseto na área.

Pelo exposto, torna-se claro que existe a necessidade de se desenvolver uma armadilha mais eficaz na detecção e monitoramento de *H. hampei*, que seja de fácil manuseio, que ofereça ao agricultor dados confiáveis sobre a população do inseto na área e que o auxilie na tomada de decisão para controle. Por consequência, a utilização desta armadilha deve ainda resultar em economia de insumos e mão-de-obra e preservação dos

agentes benéficos do agroecossistema. Não obstante, esta mesma armadilha poderia ser utilizada como uma tática de manejo populacional da praga pela coleta massal de indivíduos, bastando para isso, o aumento da proporção de armadilhas por unidade de área.

Diante das lacunas existentes no manejo de *H. hampei* este estudo buscou desenvolver uma nova estratégia de monitoramento e manejo para esta praga, incluindo um novo modelo de armadilha, quantificando o alcance da pluma da armadilha iscada com metanol-etanol, a área de captura e a probabilidade geral de captura por área, traduzindo o número da praga capturada na densidade populacional absoluta, calculando os danos projetados para a produção de café, além de um modelo de previsão de surtos e a redução na captura de insetos não alvos (parasitoides, predadores e polinizadores).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Importância de *Hypothenemus hampei* na cafeicultura

A cafeicultura é uma das principais atividades agrícolas, sendo a segunda *commodity* mais comercializada no mundo (Saberian et al. 2021; Lemma e Megersa, 2021; Kadigi et al. 2022). Ela contempla desde pequenas propriedades, até vastas áreas do agronegócio (Frederico, 2014; Babu, 2019; Deepika e Jyotishi, 2021). Sua produção na safra 2020/2021 foi de 175,8 milhões de sacas beneficiadas de 60 kg (Brainer e Ximenes, 2021). O Brasil se destaca sendo o maior produtor e exportador mundial, com uma produção esperada de 55,7 milhões de sacas para a safra de 2022, gerando milhões de empregos diretos e indiretos (Conab, 2022; Souza e Bueno, 2022).

Apesar de seu potencial produtivo, o cafeeiro é acometido por uma série de problemas fitossanitários, que atacam raízes, folhas, flores e frutos (Johnson et al. 2020; Andrade et al. 2020; Correa et al. 2021; Motta et al. 2021). Dentre as pragas, se destaca como a principal a broca-do-café, *Hypothenemus hampei* (Ferrari, 1867) (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae), causando prejuízos anuais superiores a 500 milhões de dólares (Infante, 2018; Plata-Rueda et al. 2019; Constantino et al. 2021; Vega et al. 2021). Esta praga está distribuída em quase todos os países produtores de café (Gauthier, 2010; Burbano et al. 2011) e sua área de abrangência vem se expandindo, sendo recentemente reportada pela primeira vez nas ilhas havaianas, como Lanai, e na ilha chinesa de Hainan (Gillett et al. 2020; Sun et al. 2020). Seu primeiro registro no Brasil ocorreu em São Paulo, em 1913, todavia ganhou notoriedade em 1924, devido as elevadas infestações que ocasionaram danos perceptíveis nos frutos, preocupando os cafeicultores (Berthet, 1913; Silva, 2006).

O dano da broca-do-café ocorre exclusivamente nos frutos, podendo ser de origem direta e indireta. O dano direto é retratado pela perda de massa e rendimento dos frutos, que podem chegar a mais de 50% quando fêmeas colonizadoras adultas perfuram o fruto pela região da coroa, realiza a oviposição, originando larvas que se alimentam da semente do café, até a emergência dos adultos (Montoya-Restrepo, 1999; Damon, 2000; Beilhe et al. 2020). Outro dano direto se dá pelo início da colonização do fruto que, quando não apresenta 20% de matéria seca, ideal para colonização do inseto, será danificado e abandonado, resultando no desprendimento fisiológico (Jaramillo et al. 2006). Os danos indiretos ocorrem devido a dispersão e colonização de fungos do gênero *Colletotrichum* e *Fusarium* nos frutos danificados, que diminuem o perfil de voláteis dos grãos saudáveis, assim como a qualidade da bebida (Walker et al. 2019; Silva et al. 2020; Serrato-Diaz et al. 2020).

2.2 Bioecologia de *Hypothenemus hampei*

A broca-do-café é um coleóptero, da família Curculionidae e subfamília Scolytinae (Infante et al. 2012). O adulto é um inseto de cor preta brilhante, com corpo cilíndrico e suavemente recurvo para parte posterior (Silva, 2009; Souza, 2020). Os machos apresentam vestígios de asas membranosas, sendo responsáveis pela incapacidade de dispersão por voo, que possivelmente levaram a característica de possuírem olhos rudimentares (Vega et al. 2014). Após se tornarem adultos, machos e fêmeas da mesma prole atingem a maturidade sexual com aproximadamente 2 dias, quando realizam a cópula. Este ato desencadeia reações fisiológicas e levam as fêmeas a se tornarem fototrópicas positivas, abandonando o fruto e se tornando fêmeas colonizadoras (Mathieu et al. 2001; Jaramillo et al. 2009; Silva et al. 2014).

A fêmea pode ter longevidade de até 157 dias, enquanto os machos vivem cerca de 40 dias. Além de viver por longos períodos, possuem hábito críptico, alto potencial biótico, podendo proporcionar várias gerações em um ano e coexistirem no mesmo fruto (Ticheler, 1963; Baker, 1999; Constantino et al. 2011). A razão sexual de *H. hampei* varia de 1 macho para 10 fêmeas, ou até mesmo 1 macho para 14 fêmeas (Bergamin, 1943; Baker et al. 1992; Fernández e Cordero, 2007). Quando emergem, os machos atingem a maturidade sexual antes das fêmeas, ficando prontamente disponíveis para copular até 30 fêmeas no interior de um único fruto (Bergamin, 1943; Silva et al. 2014).

Após realizarem a cópula e abandonar o fruto, com cerca de 15 dias de idade, fêmeas colonizadoras buscam frutos adequados, realizam uma perfuração na região da coroa, constroem uma galeria (5 a 11 horas para ser confeccionadas) e realizam a oviposição (Costa e Faria, 2001; Camilo et al. 2003; Pardey e Guott, 2007; Silva et al. 2014). Em condições climáticas favoráveis, uma fêmea pode ovipositar cerca de 2 ovos por dia, por um período de 15 a 20 dias, diminuindo sua capacidade ao longo do tempo. Todavia, durante seu período de oviposição pode ovipositar de 31 a 119 ovos, com relatos de até 300 ovos (Damon, 2000; Gallo et al. 2002; Jaramillo et al. 2009). Os ovos podem possuir alta viabilidade (>99%), são de formato elíptico, coloração brilhante leitosa e as larvas eclodem entre 4 a 10 dias após sua oviposição.

As larvas são de coloração creme e podem medir até 2,12 mm (Bergamin, 1943; Gallo et al. 2002; Fernández e Cordero, 2007). As larvas das fêmeas passam por dois instares, enquanto as dos machos passam por um (Bergamin, 1943; Constantino et al. 2011; Gómez et al. 2015). A fase de pré-pupa é marcada pela formação dos apêndices locomotores à medida que se transforma em pupa, a qual possui coloração branca nos primórdios e passa a ser marrom próxima a emergência, medindo de 1,89 a 1,22 milímetros (Bergamin, 1943; Fernández e Cordero, 2007). O período total das fases imaturas até a

emergência do adulto da praga é de 28 a 34 dias a 27 °C, sendo 4 dias para fase de ovo, 14 dias fase larval e 7 dias para fase de pupa (Damon, 2000).

2.3 Ecologia química de *Hypothenemus hampei*

Insetos fitófagos localizam suas plantas hospedeiras majoritariamente por estímulos químicos (Bernays e Chapman, 1994; Li et al. 2021). Fêmeas de *H. hampei*, para localizar os frutos a serem colonizados, possivelmente são guiadas por voláteis encontrados em folhas, flores e frutos do cafeeiro. Entretanto, testes com compostos provenientes das partes da planta mencionada apresentam resultados conflitantes em bioensaios de laboratório e nenhum resultado positivo em experimentos de campo (Mendesil et al. 2009; Jaramillo et al. 2013; Silva, 2014; Blassioli-Moraes et al. 2019). Os únicos compostos com efetividade na atração da praga, consagrados na literatura, compreendem a uma mistura de diferentes proporções de etanol e metanol (Mendoza-Mora, 1991; Ortiz et al. 2004; Silva et al. 2006; Souza et al. 2020).

Apesar de todos os estudos evidenciarem resposta biológica positiva para mistura de etanol e metanol, a desvantagem está atrelada a captura equivalente de insetos não alvos, principalmente da mesma subfamília, que acabam causando confusões taxonômicas, subestimando ou superestimando a população da praga por meio da amostragem com armadilhas (Messing, 2012; Johnson et al. 2018). Outro ponto negativo a esta mistura de semioquímicos se deve a baixa capacidade de atração do inseto, sendo uma pequena quantidade de insetos amostrada, o que não proporciona uma correlação precisa de insetos capturados em armadilhas e a infestação real na cultura (Vega et al. 2009; Pereira et al. 2012; Fernandes et al. 2014).

Pesquisas que se dedicaram a estudar a composição de voláteis produzidos pelos frutos de café adotaram vários estágios de desenvolvimento dos frutos, desde a fase de chumbão (acima de 20% de matéria seca) até os frutos secos (Mathieu et al. 1997; Mathieu et al. 1998). Os compostos identificados geralmente foram atrelados a bioensaios laboratoriais, associando os compostos eletrofisiologicamente ativos a ensaios de olfatométria (Mendesil et al. 2009; Jaramillo et al. 2013; Roblero e Malo, 2013). Nos primórdios das pesquisas com a finalidade de identificação dos voláteis de frutos de café, não se detectou a presença de etanol e metanol, comprovadamente ativos para a atração da praga (Mendoza-Mora, 1991; Mathieu et al. 1996; Warthen et al. 1997). Entretanto, o etanol foi identificado anos mais tarde em estudo realizado com todas as fases de desenvolvimento de frutos do cafeeiro (Ortiz et al. 2004). Até então, não se detectou o metanol em nenhum estudo visando a obtenção de compostos biologicamente ativos para *H. hampei*. O não sucesso da detecção possivelmente se deve a à alta volatilidade do

metanol e aos métodos antiquados para sua identificação (Rojas, 1999). Apesar da dificuldade de encontrar esses compostos alcoólicos, diversos outros compostos foram encontrados provenientes dos frutos, sendo os que realmente mostraram potencial por apresentarem resposta eletroantegráfica foram o: (R)-limoneno, 3-etil-4-metilpentanol, 2-heptanona, etilbenzeno, metil salicilato, α -copaeno, α -pineno, (5S,7S)-conofitorin, álcool fenil-etil, nonane, 3-etil-4-metilpentanol, 3-etil-4-metilpentanol, metilciclohexano, metilciclohexano, etilbenzeno, brocaín, nonano, 1-octano-3-ol, 1,6-dioxaspiro [4,5]-decano 2-heptano, 1-octen-3-ol e frontalín (Ortiz et al. 2004; Mendesil et al. 2009; Jaramillo et al, 2013; Roblero e Malo, 2013; Njihia et al. 2014). Apesar de terem sido realizados bioensaios laboratoriais com os compostos mencionados, sua grande maioria não apresentou resultados satisfatórios de olfatométrica (Jaramillo et al. 2013). Todavia, em estudos testando o (5S,7S)-conophthorin como possível atrativo e frontalín como repelente, concluíram que apenas o composto repelente é efetivo em condições de campo (Njihia et al. 2014).

Quase todos os estudos se dedicaram na busca por compostos atrativos provenientes de frutos em diferentes estágios de desenvolvimento (Roblero e Malo, 2013; Cruz-Lopez et al. 2016; Mendesil et al. 2019; Blassioli-Moraes et al. 2019). Entretanto, mesmo com insucesso na seleção destes novos compostos semioquímicos, poucos foram os avanços para se utilizar compostos alcoólicos já validados de maneira eficiente ao manejo da praga.

2.4 Armadilhas e o monitoramento de *Hypothenemus hampei*

As formas de monitoramento de *H. hampei* em cafezais são por meio de armadilhas iscadas com semioquímicos (amostragem indireta) ou por amostragem direta, que compreende em realizar coleta em zig-zague de frutos em lavouras (Villacorta et al. 2001; Souza et al. 2013; Infante, 2018; Ruiz-Diaz e Rodrigues, 2021). Contudo, o plano de amostragem direta de frutos é oneroso e destrutivo para a lavoura, levando a não ser frequentemente utilizado pelos agricultores. Por esta razão, tem se buscado desenvolver vários modelos de armadilhas que, atreladas aos semioquímicos, sejam eficientes (Mota et al. 2017; Souza et al. 2020b). Vários são os modelos de armadilhas utilizados, como os modelos Iapar, Ecoiapar, Etotrap, Funil Múltiplo, Brocap e Fiesta (Velasco-Pascual et al. 1997; Villacorta et al. 2001; Silva et al. 2006; Barrera et al. 2008; Pereira et al. 2012; Aristizábal et al. 2015). Geralmente estas armadilhas são vermelhas ou verdes, cores que possivelmente apresentam respostas visuais a praga, por serem as cores de frutos verdes e maduros. Estas cores foram validadas em estudos anteriores, mostrando-se ideais para confecção das armadilhas (Silva et al. 2006; Dufour e Frérot, 2008; Souza et al. 2020b).

As armadilhas devem ser iscadas com uma mistura de etanol e metanol, na proporção 1:1 ou 1:3. Segundo Mathieu et al. (1997), a proporção 1:3 por anos foi a que apresentou melhores resultados de captura. Entretanto, estudos recentes mostram superioridade nas capturas utilizando a proporção 1:1 (Silva et al. 2006; Dufour e Frérot, 2008). Independente da proporção da mistura, sabe-se que ocorrerá atração, podendo haver a captura do inseto. Um fator a ser considerado é que mesmo possuindo capacidade de captura da broca-do-café, a armadilha captura insetos de outras ordens, inclusive polinizadores e insetos da mesma subfamília, além de possuir baixo limiar de detecção (Leite, 2016; Messing, 2012; Pereira et al. 2012; Johnson et al. 2018). Estas armadilhas são em sua maioria confeccionadas de garrafas de polietileno tereftalato de diferentes tamanhos, o que podem influenciar negativamente na formação da pluma de odor e reduzir capturas. Outro fator negativo é que o grande número de armadilhas sugeridos por hectare, tanto para monitoramento quanto para controle massal (Dufour e Frérot, 2008; Fernandes et al. 2015), demandam de grande volume de líquido mortífero que impõem resistência em sua utilização.

A altura de instalação de uma armadilha é fundamental para o sucesso no monitoramento (Bavaresco et al. 2002; Silveira et al. 2017), uma vez que sua eficiência está atrelada a arquitetura das plantas de cafeeiro, que varia conforme a fenologia (Barrera, 2005). Diferentes sistemas de cultivo afetam o raio de atuação de uma armadilha com semioquímico (Kirkpatrick et al. 2019), possivelmente a altura de instalação da armadilha influencia no local de liberação da pluma de odor no ambiente, podendo sofrer maiores ações de intempéries como temperatura, ventos, entre outras, que dificultam sua formação, tornando-se menos apta a ser detectada pelo inseto. Observando o supracitado, estudos buscaram encontrar a altura ideal para captura de *H. hampei*, por exemplo, ao comparar a captura de armadilhas dispostas ao nível do solo e fixadas a 1,2 m nas plantas, verificou-se que na maior altura houve três vezes mais capturas (Dufour e Frérot, 2008). Por outro lado, Silva et al. (2006), verificaram que em armadilhas fixadas 0,5 m, 1,0 m e 1,5 m do nível do solo, alocadas no interior de lavouras, não obtiveram diferenças em sua eficiência. Entretanto ao comparar diferentes alturas de instalação de armadilhas, Ruiz-Diaz e Rodrigues (2021), comprovaram que na altura de 0,5 m ocorreu a captura de até 85% de todos os indivíduos coletados.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local de execução do projeto

Os experimentos foram conduzidos em lavouras de café conilon (*Coffea canephora* Pierre ex A. Froehner, propagado via seminífera), e café arábica (*Coffea arabica* L.), var. Catuaí vermelho IAC-44, situadas na Fazenda São Geraldo, em Santa Teresa, ES (19°55'2,86" S; 40°45'12,13" O). Ambas espécies são cultivadas a 450 m de altitude, nos espaçamentos 3 x 1 m (conilon) e 2,5 x 1 m (arábica). As lavouras não receberam controle químico para o manejo da broca-do-café e, frequentemente, apresentavam infestações de frutos superiores a 5%. A confecção das armadilhas, assim como a triagem e identificação dos insetos coletados em campo foram realizados no Laboratório de Ecologia Química e Comportamento de Insetos (LEQCI), do Departamento de Entomologia e Acarologia, da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – Esalq/USP, Piracicaba - SP.

3.2 Triagem e identificação dos insetos capturados

Os insetos capturados nas armadilhas em todos os experimentos descritos foram acondicionados em frascos de vidro de 50 ml contendo álcool 70%, os quais foram enviados para o LEQCI para identificação. Inicialmente, o material foi triado em placas de Petri (10x 1,5 cm), com auxílio de um esteriomicroscópio, onde os espécimes de *H. hampei* foram quantificados, assim como outros Scolytinae, seguindo Wood (2007) e Constantino (2011). Os demais insetos foram identificados até o nível de família ou gênero seguindo Rafael et al. (2012).

3.3 Teste de seleção de modelos de armadilhas para *Hypothenemus hampei*

Um único tipo de dispositivo difusor de atraentes voláteis foi utilizado para todos os modelos de armadilhas avaliados (Figura 1A). O atraente utilizado foi uma mistura 1:1 de etanol (CAS n. 64-17-5, pureza de 99%) e metanol (CAS n. 67-56-1; pureza de 99%) (Neon Comercial, Suzano, SP, Brasil). Uma extensa revisão de literatura realizada por Vega et al. (2015a) indicou que a mistura de etanol + metanol é a única comprovadamente eficaz na atração da broca-do-café a longas distâncias e, por esta razão, essa combinação de atraentes foi selecionada para os experimentos de campo. O difusor de compostos voláteis consistiu em um frasco de polietileno de 50 ml com um orifício de 2 mm na tampa, pelo qual foi inserido um duto de polietileno (2 mm de diâmetro x 40 mm de comprimento), com um barbante de algodão em seu interior. Essa configuração do liberador foi utilizada para

produzir uma difusão constante e uniforme dos atraentes voláteis, de acordo com os princípios descritos por Zakir et al. (2013). A taxa total de liberação dos compostos alcóolicos foi estimada em ~0,5 g/dia em condições de campo, a qual está em conformidade com os valores ótimos de atração de *H. hampei*, mostrando-se altamente eficaz (Mathieu et al. 1997; Dufour e Frérot, 2008).

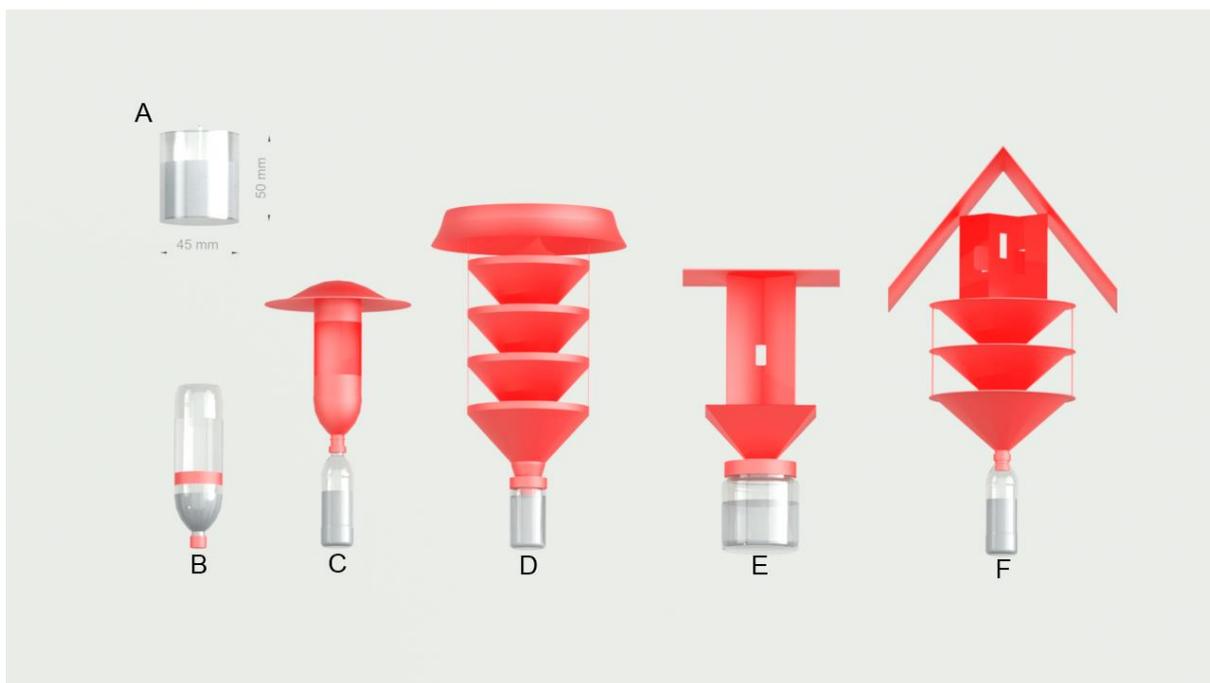


Figura 1. (A) Dispositivo difusor de atraentes voláteis; (B) armadilha “lapar”; (C) armadilha “lapar” modificada; (D) armadilha “Multifunil” ou “Lindgren”; (E) armadilha “Aletas duplas cruzadas”; e (F) armadilha “Broca Biocontrole®”.

Cinco modelos de armadilhas foram utilizados para avaliar a captura de fêmeas adultas de *H. hampei*, incluindo: (i) modelo “lapar”, constituída de uma garrafa PET de 2 L com uma única abertura lateral (13 cm de largura × 18 cm de comprimento), localizada a 15 cm da tampa da garrafa (Figura 1B); (ii) modelo “lapar” modificada, consistindo de uma garrafa PET de 2 L com duas aberturas laterais (mesmas dimensões do modelo “lapar” convencional) formando duas aletas de interceptação e um frasco coletor acoplado ao funil coletor (Figura 1C); (iii) modelo “Multifunil”, sendo uma adaptação do modelo comercial da armadilha “Lindgren” de quatro funis, com a única diferença de apresentar um ângulo mais agudo nos funis (Figura 1D); (iv) modelo “Aletas duplas cruzadas”, constituída de quatro aletas de interceptação, recipiente coletor e uma abertura central para acondicionamento do dispositivo difusor de voláteis (Figura 1E); e modelo Broca Biocontrole® (Biocontrole, Indaiatuba, SP, Brasil) (Figura 1F).

Todos os modelos de armadilha foram confeccionados ou adquiridos na cor vermelha, uma vez que esta cor apresenta maior eficiência na atração de *H. hampei* (Mathieu et al. 1997; Saravanan e Chozhan, 2003; Dufour e Frérot 2008). Em campo, as armadilhas foram penduradas sobre armações do tipo “L invertido” de cano de PVC ($\frac{3}{4}$ de polegada \times 1,5 m de altura) montados sobre barras de reforço de aço ($\frac{3}{8}$ de polegada) cravada no solo. As armadilhas foram instaladas nas entrelinhas da cultura do cafeeiro a uma distância de 15 m entre si. Os tratamentos (modelos de armadilhas) foram distribuídos aleatoriamente em quatro blocos distanciados a 30 m entre si, sendo que cada bloco possuía uma armadilha de cada modelo.

A base ou recipiente coletor de cada armadilha foram preenchidos com 300 ml de uma solução aquosa contendo sal e detergente para matar e preservar os insetos capturados. As armadilhas foram verificadas quanto à captura de insetos a cada 3 dias, ocasião em que as iscas atraentes foram repostas, o líquido preservante substituído, e cada armadilha trocada de posição dentro do bloco para evitar possíveis efeitos de posição. O melhor modelo de armadilha foi escolhido com base em dois critérios: (i) maior número de indivíduos de *H. hampei* capturados; e (ii) seletividade ou especificidade (menor número de insetos não-alvo capturados).

3.4 Determinação do raio de ação da armadilha e estimativa da densidade populacional absoluta de *Hypothenemus hampei* a partir de dados de armadilhas

Neste experimento, determinou-se o raio de ação máximo do modelo de armadilha que apresentou o melhor desempenho no experimento anterior (*i.e.*, modelo “Multifunil”; para detalhes, consultar a seção Resultados (Item 4.2). Adultos de *H. hampei* para experimentos de liberação-recaptura foram criados a partir de frutos de café arábica infestados no estágio de “passas” coletados de uma plantação adjacente à descrita no item anterior (Item 3.1), em 14 de maio de 2019. Os frutos de café foram desinfetados com uma solução de água, detergente e hipoclorito de sódio de acordo com metodologia proposta por Silva et al. (2012), em protocolo para minimizar contaminantes fúngicos. Em seguida, uma única camada de frutos tratados foi colocada em recipientes plásticos forrados com papel toalha e cobertos com tecido branco “voil”.

Os recipientes foram mantidos em uma sala (25 °C, 60% UR e 12h de fotofase) na fazenda acima mencionada. Os recipientes foram colocados próximo ao peitoril de uma janela sob luz solar indireta para estimular a saída de fêmeas colonizadoras (Mota et al. 2017). Os recipientes foram verificados a cada hora para acompanhar a emergência de brocas das 13:00 às 17:00 horas, que abrange o pico de abandono de frutos pela

colonização de fêmeas de *H. hampei* (Mathieu et al. 1997). Como os besouros surgiram de frutos de café infestados no campo, não foi possível estimar suas idades. No entanto, apenas brocas-do-café com até dois dias de emergência e que apresentaram alta capacidade de voo e movimentação dentro dos recipientes foram utilizadas para os ensaios.

Para a marcação dos insetos, fêmeas colonizadoras de *H. hampei* emergidas foram individualizadas em grupos de 100 indivíduos em tubos Falcon de 45 ml e depois transferidas para placas de Petri (90 mm de diâmetro e 15 mm de altura) forradas com papel filtro contendo cerca de 4 mg de pó fluorescente (DayGLO Color Corporation, Cleveland, OH, EUA). Esta quantidade foi utilizada para marcar as fêmeas de *H. hampei* corretamente sem afetar sua capacidade de voo ou sobrevivência (dados não mostrados). As placas foram mantidas sob luz de LED por 2h para estimular o movimento das brocas, o que melhorou a cobertura de seus corpos com o pó fluorescente (Figura 2).

Grupos de 100 besouros foram polvilhados com uma cor fluorescente diferente para cada uma das distâncias de liberação testadas. As cores usadas foram: ECO11 Aurora Pink®, ECO13 Rocket Red™, ECO15 Blaze Orange™, ECO17 Saturn Yellow®, ECO18 Signal Green™, ECO19 Horizon Blue™ e ECO21 Corona Magenta™. Por fim, os besouros marcados foram transferidos para uma placa de Petri contendo apenas o papel de filtro e mantidos durante a noite nas condições climáticas supracitadas.



Figura 2. Fêmeas colonizadoras de *Hypothenemus hampei* marcadas com pó fluorescente (DayGLO Color Corporation, Cleveland, OH, USA).

Para captura dos insetos liberados usamos a armadilha já mencionada (Multifunil), modelada de acordo com (Lindgren, 1983). Para a retenção dos insetos recapturados, a base da armadilha foi substituída por um pote plástico (7 cm de diâmetro x 14cm de altura) contendo no fundo um disco de papel cartolina de cor preta (6,9 cm de diâmetro), impregnado com uma camada de 2 mm de cola adesiva (Colly Química Indústria e Comércio

Ltda., Mombuca, SP, Brasil). A isca utilizada para atração consistiu em um frasco liberador de polietileno de 50 ml preenchido com uma mistura 1:1, de etanol (CAS no. 64-17-5, pureza de 99%) e metanol (CAS no. 67-56-1; pureza de 99%) (Neon Comercial, Suzano, SP, Brasil). O frasco foi equipado com um pavio de algodão de 70 mm de comprimento dentro de um tubo de polietileno (40 mm de comprimento, 2 mm de diâmetro) para fornecer uma liberação constante e uniforme da mistura de álcool em cerca de 0,5 g/dia, que provou ser ótimo para atração de *H. hampei* (Mathieu et al. 1997; Dufour e Frérot, 2008).

Para a liberação e recaptura, grupos de 100 fêmeas de *H. hampei* foram soltas nas quatro direções cardeais a 2, 4, 8, 12, 16, 20 e 24 m de uma armadilha central iscada com os compostos citados acima anteriormente, totalizando 400 besouros marcados com a mesma cor fluorescente por distância (Figura 3). Os besouros foram soltos às 12h abrindo as placas de Petri permitindo que voassem por conta própria. A armadilha foi avaliada uma vez por dia (às 17h), por três dias consecutivos, após os quais as fêmeas marcadas de *H. hampei* não foram mais recapturadas, como confirmado em ensaios anteriores (dados não apresentados). O papelão adesivo foi substituído e o reservatório de álcool foi reabastecido após cada avaliação. As brocas de café que estiveram presas ao cartão adesivo foram contadas com auxílio de estereoscopia sob luz negra ultravioleta, que permitiu a identificação dos insetos marcados (fluorescentes) e não marcados (Adams et al. 2017a; Kirkpatrick et al. 2018). A contagem de fêmeas marcadas de *H. hampei* de uma coleta de 3 dias foi considerada uma repetição. O experimento foi repetido cinco vezes durante o período de pós-colheita do café, ou seja, nos dias 21 e 25 de maio e 4, 8 e 16 de junho de 2019.

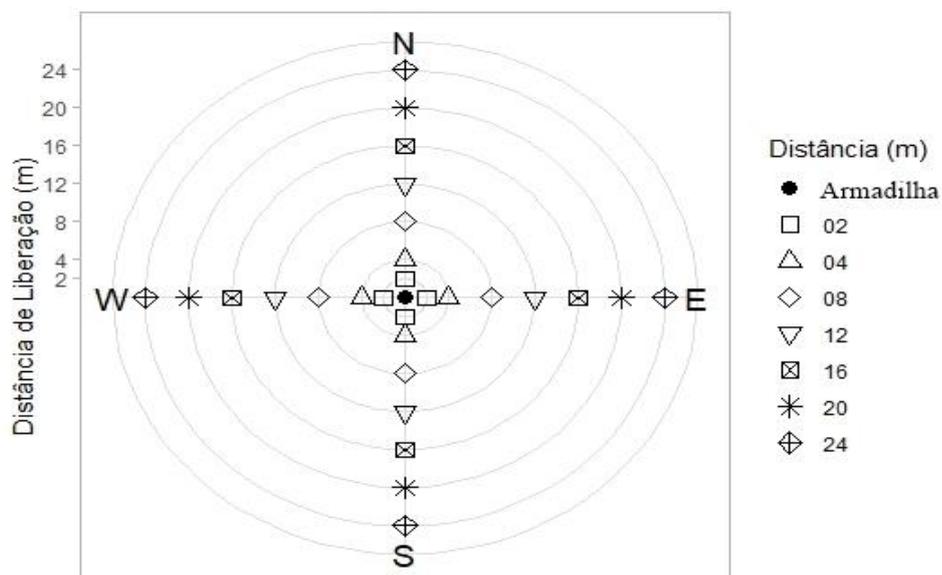


Figura 3. Croqui do experimento de determinação do raio de ação da armadilha para *Hypothenemus hampei*.

3.5 Determinação do nível de dano econômico com o novo modelo de armadilha

Por definição, o nível de dano econômico (NDE) é a menor densidade de população de uma praga que resulta em dano econômico e que justifica que as aplicações de medidas de controle sejam adotadas (Stern et al. 1959). É o valor mais conhecido e usado na tomada de decisão visando o manejo de uma praga. Na literatura, este valor para a broca-do-café gira em torno de 3 a 5% de frutos brocados, todavia, sem cálculos demonstrativos do motivo de adotar estes valores. Contudo, mesmo adotando este NDE, somente pode ser conhecido por meio de um plano de amostragem de frutos, o qual é oneroso e destrutivo para a lavoura. Por esta razão, um dos objetivos do presente projeto foi relacionar valores do NDE pela amostragem de frutos com os dados de captura com o novo modelo de armadilha.

A partir disso, determinou-se o NDE com os dados de captura obtidos semanalmente com a presente armadilha. O experimento foi realizado em uma área de 3 ha cultivados com café arábica (*C. arabica*), situado na Fazenda São Geraldo, em Santa Teresa, ES (19°55'2,86" S; 40°45'12,13" W), cultivados em espaçamento 3 x 1 m, com idade de 7 anos. Esta espécie de café foi selecionada visto que é a mais cultivada no Brasil e no mundo, sendo, portanto, de maior demanda por informações a respeito do NDE. Cinco armadilhas foram instaladas na distância de 16 m (raio de ação encontrado no experimento anterior a este estudo), no mês de setembro de 2020, que coincidiu com a fase de botão floral dos cafeeiros no estado do Espírito Santo.

Nesta fase fenológica, apesar do trânsito de *H. hampei*, as fêmeas não encontram frutos para colonização e são obrigadas a retornarem para frutos secos remanescentes da safra anterior (Rodríguez-Benito et al. 2018; Dufour et al. 2000). A partir do aparecimento dos frutos no estágio de chumbão, *i.e.*, quando possuíam mais de 20% de matéria seca exigida para o desenvolvimento das larvas da broca (Jaramillo et al. 2006), até o estágio de coco, as amostragens de frutos em plantas selecionadas foram feitas paralelamente ao das armadilhas.

O protocolo de monitoramento direto de *H. hampei* foi realizado de maneira aleatória, amostrando cerca de 30 plantas de cafeeiro por área de 0,5 a 1,5 ha. Cada planta foi selecionada ao acaso, assim com um de seus ramos plagiotrópicos produtivos, sendo os frutos em desenvolvimento examinados e quantificados quanto aos orifícios de entrada da praga (Aristizábal et al. 2017; Johnson et al. 2018). A fenologia dos frutos de café possui quatro fases: desenvolvimento da gema floral, floração, frutificação e maturação (Morais et al. 2008), sendo o intervalo entre as fases variando conforme fatores climáticos. Foram escolhidos destes estágios fenológicos, subfases com variação de dias, sendo estas as mais visíveis para os cafeicultores (*i.e.*, flor, chumbinho [até 3 mm de comprimento],

chumbão (expansão) [> 15 mm de comprimento], maturação e pós-colheita) (Pezzopane et al. 2003; Kirkpatrick et al. 2018).

A partir da fase chumbão foi considerado período mais crítico, tendo em vista que é a que marca o início da multiplicação da broca e os consequentes danos nos frutos de café. As avaliações com armadilhas anteriores a estas fases também foram computadas, pois indicaram o início do trânsito da broca e permitiram que medidas de controle fossem planejadas para a redução do potencial de inóculo para as safras posteriores. Em paralelo ao experimento de campo, a perda de massa de frutos de café arábica foi adquirida em revisão de literatura (Toledo et al. 1947).

3.6 Desenvolvimento do modelo relação entre a taxa intrínseca de aumento natural (r) e a temperatura

Lacerda et al. (2019) mostraram que uma função gaussiana representa melhor a relação entre a temperatura e a taxa líquida de reprodução. Aqui, utilizou-se uma função Gaussiana para representar a relação entre a taxa intrínseca de aumento natural (r) e a temperatura (Figura 4).

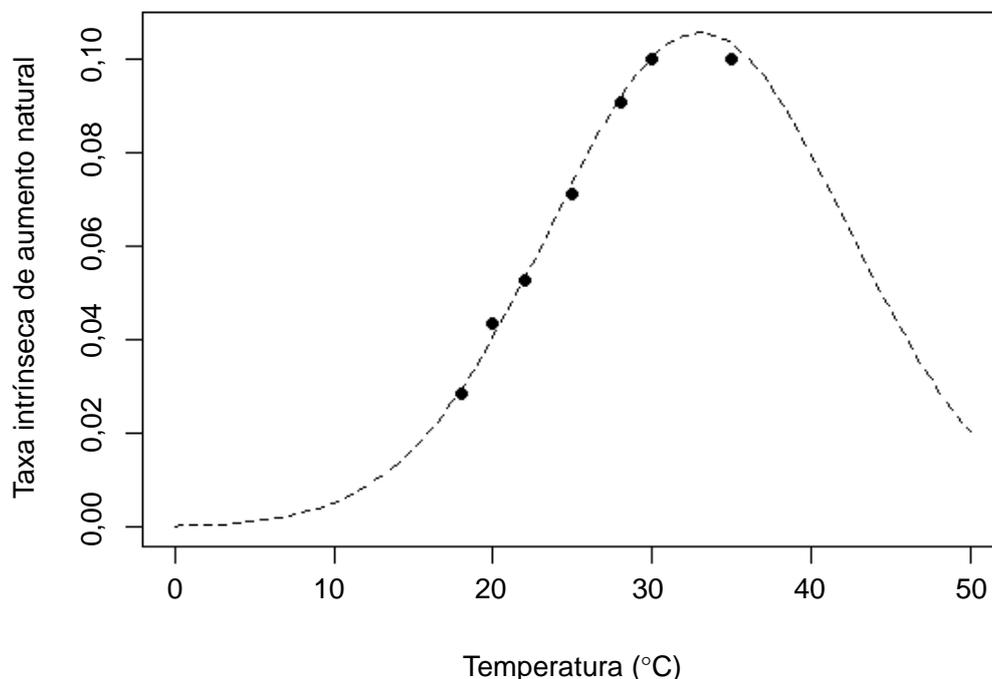


Figura 4. Modelo Gaussiano da taxa intrínseca de aumento natural de *Hypothenemus hampei* em função da temperatura (°C).

A capacidade suporte pode ser definida como a população máxima de um indivíduo que uma determinada área pode sustentar (Hartvigsen, 2001). No entanto, pode ser altamente influenciada pelo estágio fenológico da planta hospedeira (Kindlmann et al. 2007). Segundo Souza et al. (2020b), a fenologia da produção de café pode ser dividida em expansão, granação (Chumbão), maturação, pós-colheita, floração e chumbinho. Com base nessa classificação e devido a ausência de estudos para determinar a capacidade de suporte da broca-do-café em cafeeiros, assumiu-se o número máximo de insetos coletados quinzenalmente por estágio, proveniente do estudo da determinação do nível de dano econômico com o novo modelo de armadilha (item 3.3) como o número máximo de indivíduos que pode ser sustentado de acordo com a fenologia de cada estágio (Tabela 1).

Tabela 1. Estágios fenológicos da produção de café no Brasil e a capacidade suporte correspondente (número máximo de insetos coletados quinzenalmente em cada estágio fenológico).

Estágios fenológicos	Período	K (capacidade de suporte)
Expansão	Dezembro	138
Granação	Janeiro	96
Granação	Fevereiro	96
Granação	Março	96
Maturação	Abril	362
Maturação	Maio	362
Maturação	Junho	362
Maturação	Julho	362
Pós-colheita	Agosto	76
Floração	Setembro	340
Chumbinho	Outubro	124
Chumbinho	Novembro	124

Para o desenvolvimento do modelo relação entre a taxa intrínseca de aumento natural (r) e a temperatura, foi elaborado a dinâmica populacional da broca-do-café utilizando um modelo logístico (Gotelli, 2007). No entanto, adotou-se valores variáveis de capacidade suporte (K) e taxa intrínseca de aumento natural (r), considerado as estratégias de métodos de controle com eficiência de 80%. Após gerar uma equação, simulações foram realizadas utilizando dados climáticos do município de Santa Teresa – ES, onde os experimentos foram realizados. Para o modelo foram utilizados dados de tabela de vida obtidos em Giraldo-Jaramillo et al. (2018). Comparou-se o número observado de broca-do-café em nossa armadilha com a produção prevista, utilizando as equações da correlação entre captura da broca-do-café e nível de infestação dentro do raio de ação da armadilha, e

dados de processamento obtidos por Toledo et al. (1947) e Gallo (2002), em relação à perda de massa de grãos e nível de infestação, converteu-se o número de insetos de broca-do-café em danos às plantas (%). A metodologia estatística detalhada encontra-se no Item (3.6).

3.7 Análises estatísticas

Os dados do teste de seleção de modelos de armadilhas (item 3.1) foram avaliados quanto à normalidade e homocedasticidade pelo teste de Shapiro-Wilk e Bartlett, respectivamente. Na ocasião em que os dados violaram os pressupostos para análise de variância (Sokal e Rohlf 1995), estes foram submetidos ao teste não-paramétrico de Friedman (PROC FREQ; SAS Institute, 2011). As repetições consistiram nas datas de avaliação multiplicadas pelo número de blocos, repetições em que menos de 10 brocas e/ou nenhum indivíduo de outras espécies de insetos foram capturados (devido a condições climáticas desfavoráveis aos insetos, por exemplo), foram excluídas das análises. Posteriormente, as médias foram contrastadas par a par pelo teste de Ryan-Einot-Gabriel-Welsch Q (REGWQ), que controla o erro experimental do tipo I.

Os dados de recaptura de fêmeas colonizadoras marcadas nas cinco repetições foram analisados por regressão linear e não linear, usando mínimos quadrados como método de ajuste. Especificamente, a regressão linear foi empregada para determinar a relação entre a proporção de recapturas e as distâncias de liberação. Além disso, seguindo a terminologia e metodologia de Miller et al. (2015), construiu-se três gráficos de dispersão, a partir dos quais foram geradas curvas de ajuste não linear, incluindo: 1) proporção não transformada de brocas recapturadas (spT_{fer}) *versus* distância de liberação da armadilha central. Neste caso, quando o padrão da curva ajustada é suavemente côncavo, aproximando-se assintoticamente da captura zero, o gráfico indica que as distâncias de liberação foram adequadamente selecionadas e que o inseto alvo se move aleatoriamente no campo (Miller et al. 2015); 2) proporção inversa de fêmeas de broca recapturadas ($1/spT_{fer}$ média) *versus* distância de liberação da armadilha central, cuja inclinação foi usada para determinar o alcance da pluma da armadilha a partir de curvas padrão traçadas (isto é, Figura 4.12 em Miller et al. 2015); e 3) área de liberação do anel $\times spT_{fer}$ *versus* distância de liberação da armadilha central. A linha de ajuste resultante foi projetada da origem em direção ao ponto de intersecção no eixo x para determinar a distância máxima de voo de dispersão de 95% da população da praga.

Como nenhuma broca marcada foi recapturada a 20 e 24 m (ver Resultados item 4.2), essas distâncias foram excluídas das análises (Miller et al. 2015). Foram considerados modelos de melhor ajuste aqueles que satisfizeram os pressupostos de normalidade dos

resíduos (teste de Shapiro-Wilk), homocedasticidade da variância dos resíduos (gráfico de homocedasticidade ou teste para ponderação adequada da soma dos quadrados) e apresentaram maior R^2 . Todas as análises e testes foram feitos no GraphPad Prism versão 10.0.2 para Windows (GraphPad Software, Boston, Massachusetts, EUA).

Como o alcance da pluma não pôde ser estimado com precisão usando curvas padrão (Miller et al. 2015; ver Resultados), calculou-se alternativamente o raio de atração efetivo (EAR), que mede a força de atração de uma armadilha semioquímica, seguindo a equação por Byers (1999): $NA = NB \times (EAR/R \times \pi)$, onde NA é o número previsto de besouros marcados recapturados, NB é o número de besouros marcados liberados dentro do raio da armadilha, R é o raio da armadilha (ou seja, maior distância de liberação que resultou na captura) e EAR é o raio efetivo de atração (m) da armadilha. Em uma planilha do Microsoft Excel foi simulado o efeito da EAR sobre a NA. O valor EAR melhor ajustado aos nossos dados foi determinado incrementando o EAR em passos de 0,01 de 0, até o valor que resultou no valor de NA mais próximo do nosso valor observado dados recapturados (Byers, 1999). A área de cada anel de aprisionamento foi calculada subtraindo o raio interno ao quadrado do raio externo ao quadrado e depois multiplicando por π (Adams et al. 2017b). O raio de captura foi calculado somando a distância máxima de voo de dispersão e o alcance da pluma (EAR). Toda a área de captura foi calculada usando a equação da área do círculo, ou seja, $\pi \times r^2$. A média ponderada da probabilidade de captura (T_{fer}) de brocas foi calculada dividindo a área média do anel $\times spT_{fer}$ pela área média do anel.

A densidade populacional absoluta de brocas (n° de fêmeas colonizadoras ha^{-1}) foi estimada a partir do número total de brocas da mesma espécie capturadas por armadilha de monitoramento por hectare, dentro de um período de 3 dias. Para isso, o número de brocas capturadas foi dividido inicialmente pela área da armadilha (ha) e depois pela T_{fer} (Miller et al. 2015). Como os machos da praga são significativamente em menor número e não abandonam os frutos (Vega et al. 2015), eles não foram utilizados para densidade populacional ou estimativa de danos às culturas. Estimamos os danos causados à produção de café arábica pela broca-do-café na região de Santa Teresa, onde foram realizados os experimentos.

Os danos foram baseados na densidade populacional estimada da broca (ver Resultados), bem como nos dados médios sobre a taxa intrínseca de aumento natural ($r = 0,045$) e tempo de geração ($T = 65,3$) em cerca de $21,2^\circ C$ (Ruiz-Cárdenas e Baker, 2010), que corresponde à temperatura média em Santa Teresa, de janeiro (preenchimento precoce dos grãos de café) a maio (colheita). Consequentemente, cerca de duas gerações (F2) da praga podem ocorrer durante este período (Ruiz-Cárdenas e Baker, 2010). A taxa reprodutiva líquida (R_0), o número médio de fêmeas produzidas em duas gerações sucessivas, foi calculada para cada geração seguindo a fórmula de Birch (1948): $R_0 =$

$eexp(r \times T)$. O número médio de indivíduos sustentados por fruto de café é aproximadamente de 100 (Jaramillo et al. 2009). Como os frutos abrigam duas sementes, o número de grãos de café perfurados pelo inseto por hectare foi obtido dividindo R0 por 50. A partir do peso médio de 100 grãos de café comercializados com 12% de umidade (15 g), estimou-se que aproximadamente 6.667 frutos rendem 1 kg. Portanto, para expressar as perdas em quilogramas de grãos de café por ha, dividimos o número de grãos perfurados por 6.667.

Para elaboração da análise dos modelos aplicados à perda de massa em função do nível de infestação, com intuito de entender a influência do nível de infestação na perda de massa dos grãos (item 3.3), foram utilizados os modelos linear, exponencial e sigmoide. Os parâmetros que compõem cada um dos modelos foram estimados pelo método de Levenberg-Marquardt, usando-se o pacote minpack.lm (Elzhov et al. 2016). A escolha do modelo foi baseada no coeficiente de determinação (R^2), critério de informação de Akaike (AIC), no logaritmo de máxima verossimilhança (LogLik) e na Soma de Quadrados Residuais (RSS) de todos os modelos, sendo os modelos com melhor ajuste os que apresentam menores valores de AIC e RSS e maiores valores para R^2 e LogLik. O nível de dano econômico foi estimado com base no coeficiente angular de ajuste das curvas de perda de massa em função do nível de infestação (β_2 , adimensional), custo operacional de produção (COP, em R\$), valor do produto (V, em R\$) e eficiência de controle (EF, em %), sendo aplicado na seguinte fórmula: $NDE = COP / (\beta_2 \cdot V \cdot EF) \cdot 100$, sendo gerado apenas um valor e, que este foi variável em função do COP e do V, em que fixou-se a eficiência de controle e o valor de β_2 e foi realizada uma simulação variando os valores de COP e V, gerando uma matriz de valores (Material suplementar), que posteriormente foi apresentado em um gráfico de superfície de resposta para melhor compreensão da variação do NDE nas variadas circunstâncias simuladas.

Para o desenvolvimento do modelo relação entre a taxa intrínseca de aumento natural (r) e a temperatura (item 3.4) foi necessário descrever a dinâmica da broca-do-café, utilizando um modelo logístico (Gotelli, 2007). No entanto, adotou-se valores variáveis de capacidade de suporte (K) e taxa intrínseca de aumento natural (r). Assim, a capacidade de suporte foi dependente do estágio fenológico das plantas de café, $K(p)$, e a taxa intrínseca de aumento natural foi dependente da temperatura, $r(T)$. Além disso, foi incluído um fator $(1-C)$, que representa a redução da população devido à eficácia de uma estratégia de controle, dada por C . Portanto, a forma da equação logística foi:

$$B_{n+1} = B_n + (1 - C) r(T) B_n \left(\frac{1 - B_n}{K(p)} \right)$$

O algoritmo utilizado está disponível como Material Suplementar. Utilizando o banco de dados de temperatura do município de Santa Teresa – ES, correspondente ao mesmo período em que os dados de campo foram coletados (2019/2020), realizou-se uma simulação para comparar o número observado de broca-do-café em nossa armadilha com a produção prevista fornecida pelo modelo. A qualidade do ajuste do modelo aos dados foi medida pelo erro médio quadrático relativo, $RRE = (\text{erro r.m.s.}) / (\text{contagem r.m.s.})$ (Garcia et al. 2019).

Em seguida, usando o mesmo banco de dados, simulamos mais cinco cenários durante 1200 dias (~3 anos e meio) (etapas de tempo):

- a) Uma estratégia de controle, $C=0,8$. Aplicado durante a fase de maturação.
- b) Uma estratégia de controle, $C=0,8$. Aplicado durante a fase de floração.
- c) Uma estratégia de controle, $C=0,8$. Aplicado durante a fase de expansão e maturação.
- d) Uma combinação entre as estratégias (a) e (b).
- e) Uma estratégia de controle, $C=0,8$. Aplicado durante a fase de floração, expansão e maturação.

Utilizando as equações $\hat{Y}=1,5082 e^{(0,0069 x)}$ e $\hat{Y}= -0,0156764 + 0,1868517 x$, da correlação entre captura da broca-do-café e nível de infestação dentro do raio de ação da armadilha, e dados de processamento obtidos por Toledo et al. (1947); Gallo (2002), em relação à perda de massa de grãos e nível de infestação foi convertido o número de insetos da broca do café em danos às plantas (%), gerando previsões úteis no manejo da praga.

4. RESULTADOS

4.1 Teste de seleção de modelos de armadilhas para *Hypothenemus hampei*

Considerando o uso da mistura de etanol (EtOH) + metanol (MetOH) (1:1), verificou-se que, independentemente do modelo de armadilha testado, não houve diferença significativa na captura de fêmeas colonizadoras de *H. hampei* (Teste de Friedman: $Q_{4,80} = 6,1244$; $P = 0,1901$, outros Scolytinae (Teste de Friedman: $Q_{4,75} = 1,0963$; $P = 0,4989$) e outros coleópteros (Teste de Friedman: $Q_{4,80} = 4,2606$; $P = 0,3719$). Todavia, quando as armadilhas foram avaliadas para outras ordens de insetos, excluindo-se Coleoptera, houve diferença significativa no número de insetos capturados (Teste de Friedman: $Q_{4,80} = 21,5890$; $P < 0,0001$; Figura 5).

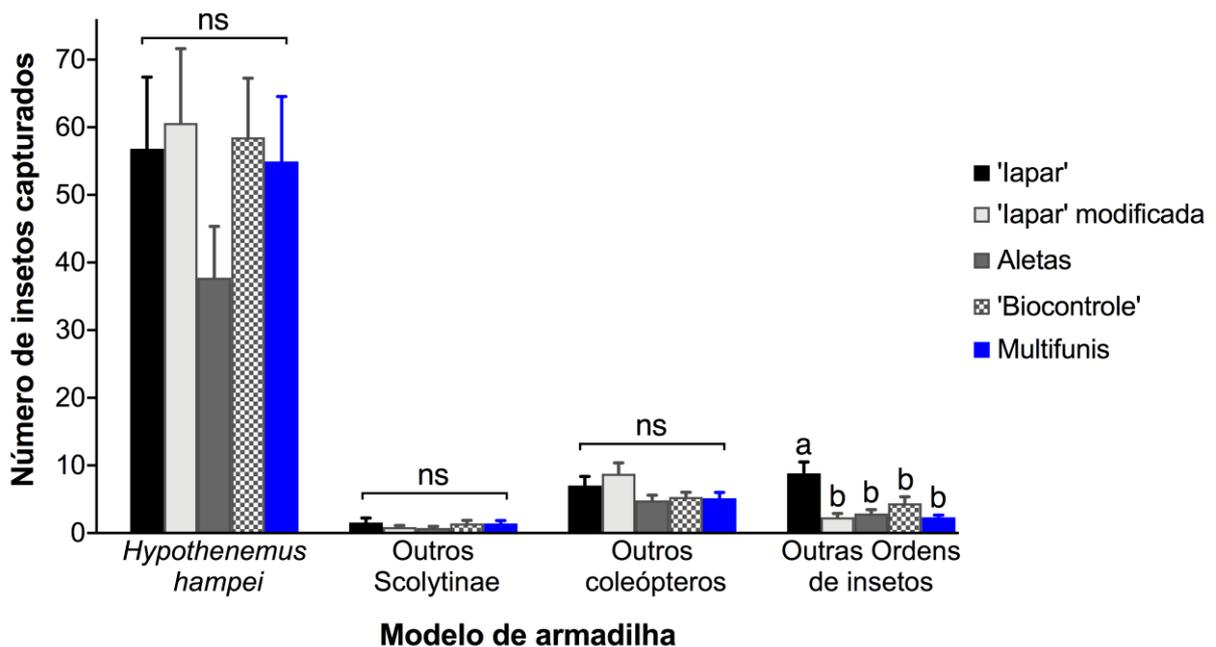


Figura 5. Média (\pm EP) do número de adultos de *Hypothenemus hampei*, outros Scolytinae, outros Coleoptera e insetos pertencentes a outras ordens capturados em diferentes modelos de armadilhas iscasadas com etanol + metanol (1:1). Médias seguidas pela mesma letra, em cada quadro, não diferem estatisticamente entre si de acordo com o teste REGWQ ao nível de 5% de probabilidade.

De forma geral, os modelos de armadilha avaliados apresentaram desempenho semelhante, com exceção da armadilha “Iapar”, que capturou um número estatisticamente superior de insetos não-alvo, isto é, insetos pertencentes a quaisquer ordens, exceto Coleoptera (Figura 5). Contudo, a armadilha “Multifunil” apresentou melhor operacionalidade

em relação às demais, incluindo maior facilidade de instalação e manutenção, além de proporcionar menor incidência de materiais indesejáveis na armadilha e no recipiente coletor. Com base nos critérios de desempenho descritos, o modelo de armadilha “Multifunil” foi selecionado para a condução dos experimentos subsequentes.

4.2 Determinação do raio de ação da armadilha e estimativa da densidade populacional absoluta de *Hypothenemus hampei* a partir de dados de armadilhas

No geral, 97,7% das 2.800 fêmeas colonizadoras de *H. hampei* marcadas em cada uma das cinco réplicas voaram se dispersando, ou seja, não foram encontradas mortas nas plataformas de lançamento ou abaixo delas. A partir das sete distâncias de liberação, as recapturas realizadas pela armadilha central com isca de semioquímicos ocorreram até o raio de 16 m. A recaptura geral dos insetos liberados foi de 2,6% (Tabela 2). Destas recapturas, 98,6% ocorreram nas primeiras 24 horas após a soltura; 1,4% entre 24 e 48 horas, e nenhuma broca-do-café foi recapturada após esse período (Tabela 2). Além disso, 96% das recapturas ocorreram nas distâncias de liberação 2 e 4 m, sendo que em 100% nas demais distâncias, as capturas ocorreram nas primeiras 24 horas após a liberação (Tabela 2).

Tabela 2. Número médio (\pm EP) de brocas-de-café, *Hypothenemus hampei*, marcados e liberados em diferentes distâncias de uma armadilha funil vermelha central de 4 unidades, iscada com etanol e metanol (1:1), e porcentagem de recapturas por distância de liberação ao longo do tempo (N = 5 repetições).

Distância de Liberação (m)	Nº de insetos liberados ^a	% recaptura	% recaptura ao longo do tempo Liberação ^b		
			24h	48h	72h
2	389,6 \pm 0,7	7,2 \pm 0,6	97,6 \pm 1,7	2,4 \pm 1,7	0
4	391,8 \pm 0,9	3,2 \pm 0,3	95,2 \pm 2,0	4,8 \pm 2,0	0
8	391,0 \pm 1,0	1,4 \pm 0,2	100	0	0
12	390,2 \pm 1,1	0,9 \pm 0,1	100	0	0
16	391,6 \pm 1,1	0,5 \pm 0,1	100	0	0

^a Nº de besouros marcados (400 indivíduos) que voaram das plataformas de soltura

^b Calculado com base no número total de besouros recapturados a cada distância

Houve uma diminuição significativa na proporção de besouros recapturados com o aumento da distância de liberação ($F = 266,8$, $df = 23$, $P < 0,0001$), com o modelo de

regressão linear explicando cerca de 92% da variância total das recapturas (Figura 6). A proporção média (\pm EP, $n = 5$ repetições) de besouros recapturados para a distância de liberação mais próxima a 2 m foi de $0,072 \pm 0,006$ e foi de $0,005 \pm 0,001$ para a maior distância (16 m). A probabilidade geral de captura para todas as áreas de anéis de captura (T_{fer}) foi de 0,01. A curva de ajuste não linear para a proporção não transformada de fêmeas colonizadoras recapturadas por distância de liberação foi suavemente côncava, aproximando-se da assíntota zero à medida que as recapturas diminuíram com aumentos regulares na distância da armadilha central de álcool (Figura 7a).

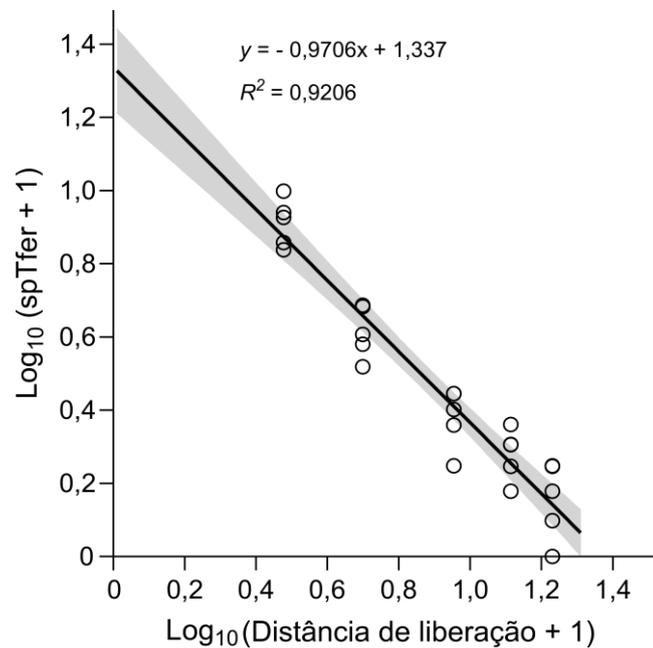


Figura 6. Proporção de recaptura (spT_{fer}) de brocas-de-café, *Hypothenemus hampei*, marcadas em diferentes distâncias de liberação de uma armadilha central iscada com etanol-metanol (1:1). As variáveis dependentes e independentes foram transformadas logaritmicamente para atender às premissas da regressão linear. A linha sólida representa o modelo de melhor ajuste e a área cinza representa os intervalos de confiança de 95%.

A proporção inversa de brocas recapturadas por distância de liberação (Figura 7B) foi linear nos pontos de dados mais próximos, com uma inclinação acentuada (9,599) que estava fora da curva padrão do gráfico de Miller para a estimativa do alcance da pluma. Alternativamente, o raio de atração efetiva estimada da armadilha (EAR) de álcool foi de $1,3 \pm 0,1$. Finalmente, a interceptação x projetada para a curva polinomial de segunda ordem da área anular de liberação \times spT_{fer} por distância de liberação mostrou que a distância máxima de dispersão de 95% para brocas liberadas foi 22,2 m (Figura 7C). A soma da EAR e da distância máxima de voo de dispersão equivale a uma área de amostragem para a presente armadilha de álcool de 1734,9 m² ou 0,17 ha.

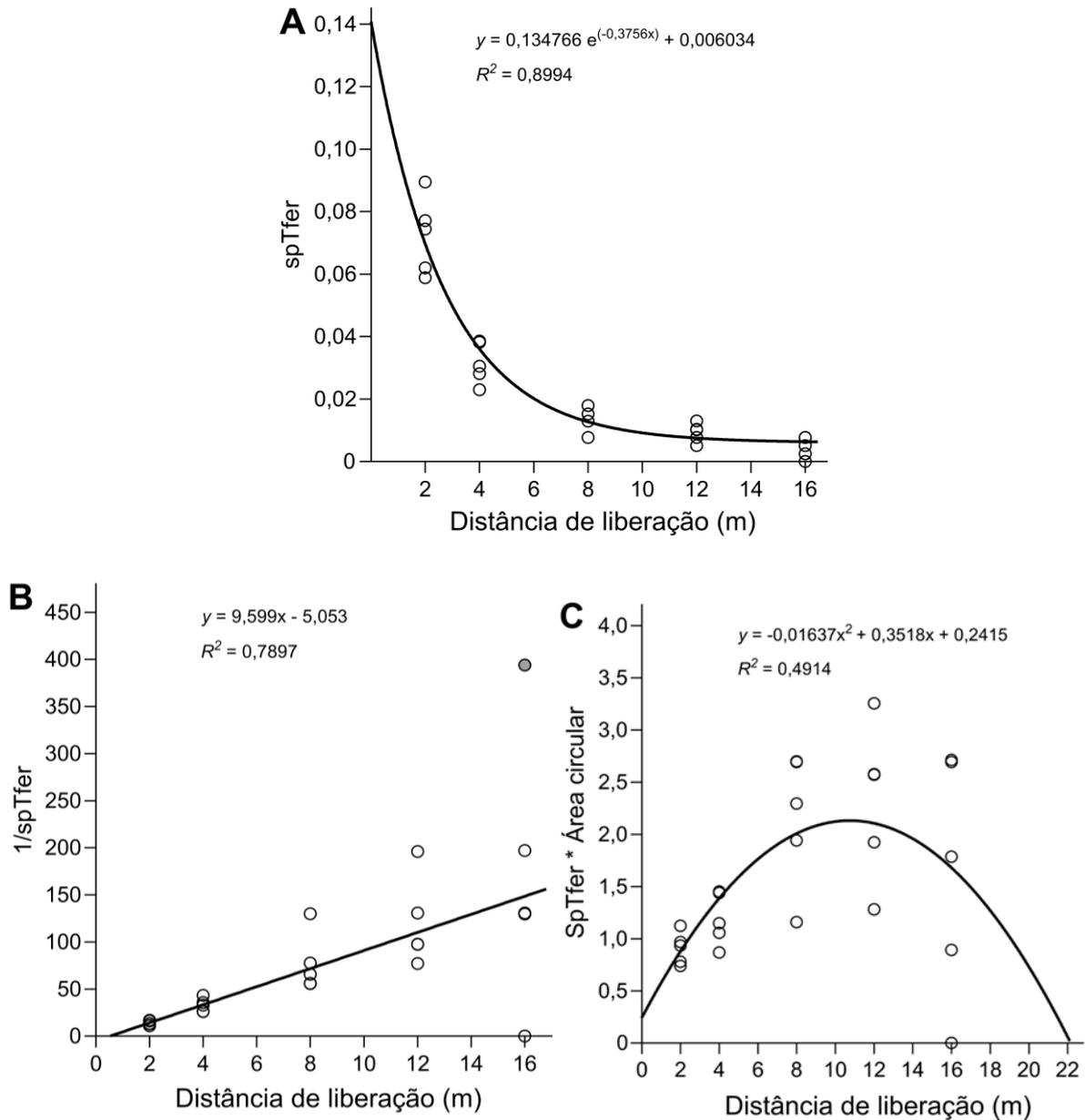


Figura 7. Análises de regressão não linear com dados de experimentos de armadilha única e distância de liberação múltipla com brocas-do-café, *Hypothenemus hampei*, marcadas. (A) Proporção de recaptura (spT_{fer}) versus distância de liberação (m) de uma armadilha central com isca de álcool; (B) Inverso da proporção de recaptura por distância de liberação; (C) Área do anel SpT_{fer} versus armadilha ao longo da distância de liberação. A linha sólida em cada painel representa o modelo não linear de melhor ajuste. O ponto cinza em B representa o valor discrepante excluído da análise usando o detector de valores discrepantes GraphPad Prism em $Q = 1\%$ (Motulsky e Brown, 2006).

A estimativa da densidade populacional absoluta de *H. hampei* a partir de dados de armadilhas foi realizada a partir de capturas de 1, 10 e 100 fêmeas colonizadoras da praga utilizando uma armadilha/ha. Desta forma, estimamos uma densidade populacional absoluta de 565, 5.653 e 56.530 indivíduos $há^{-1}$, respectivamente. Assim, ao se estimar as perdas na produção de café, causadas a partir da densidade populacional inicial de 56.530 fêmeas colonizadoras $há^{-1}$, no estágio inicial de enchimento dos grãos de café, o valor estimado da

taxa reprodutiva líquida (R_0) na colheita do café (geração F2) foi de 20,2 milhões de bhácas ha^{-1} . Conseqüentemente, a perda estimada de produção de grãos de café verde foi de 60,3 $kháha^{-1}$.

4.3 Determinação do nível de dano econômico com o novo modelo de armadilha

O modelo linear foi o que apresentou melhor adequação ao percentual de perda de massa em função do nível de infestação de *H. hampei* (Tabela 3; Figura 8). A escolha deste modelo é proveniente da obtenção do coeficiente de determinação (0,9915), critério de informação de Akaike (110,84), logaritmo de máxima verossimilhança (-52,423) e Soma de Quadrados Residuais (18,922), mostrando que o modelo linear é o mais ajustado para estimar a perda de massa de grãos em função do nível de infestação de *H. hampei*.

Tabela 3. Critério de seleção dos modelos referentes à estimativa de perda de massa de grão em função do nível de infestação de *Hypothenemus hampei*

Modelos	R ²	AIC	LogLik	RSS
Linear	0,9915	110,84	-52,423	18,922
Exponencial	0,9052	254,36	-124,18	166,469
Sigmoidal	0,9781	167,79	-79,894	43,502

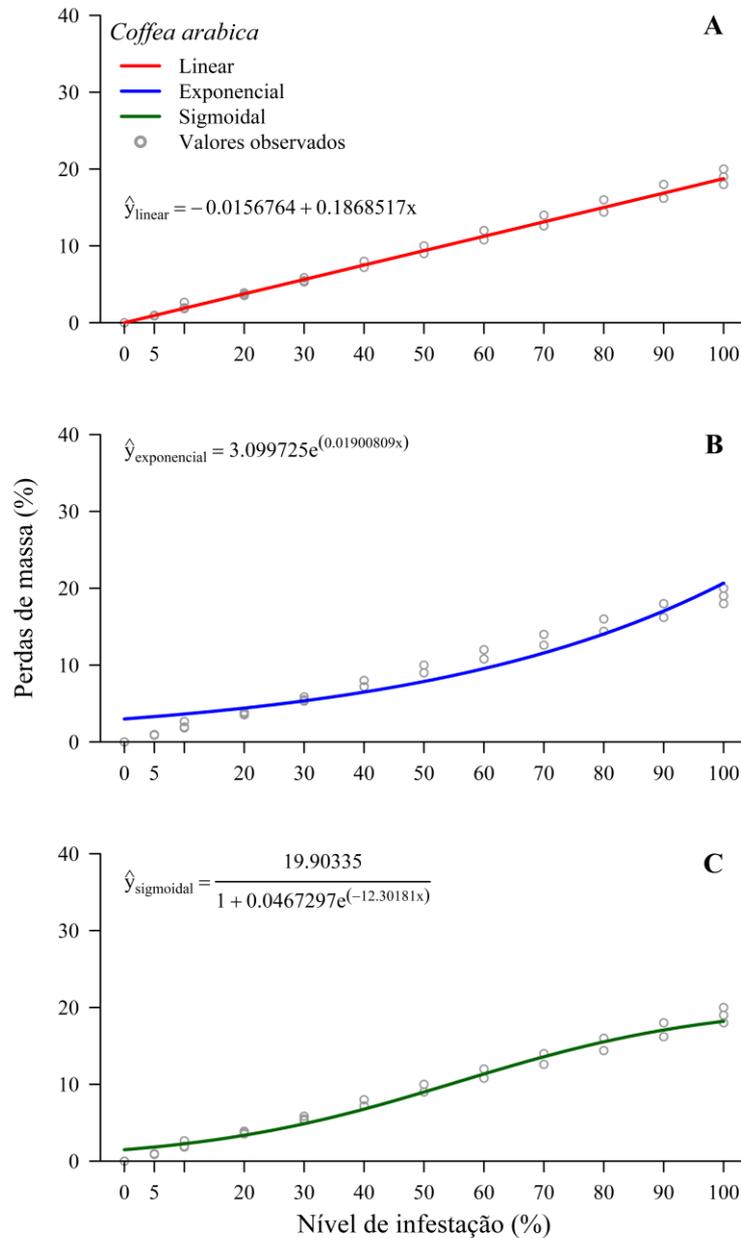


Figura 8. Perda de massa de grãos *Coffea arabica* em função do nível de infestação de *Hypothenemus hampei*. Modelo linear (A), exponencial (B) e sigmoial (C).

Com base na variação simulada para possíveis valores do produto (V) e custos operacionais de produção (COP) verificou-se que houve uma variação referente ao valor do NDE, que apresentou elevada plasticidade (Figura 9). Valores com o menor preço (R\$ 300,00) proposto por saca e um elevado custo de produção (R\$ 1.600,00) por saca levaram a um NDE de 1,50%, enquanto que, quando foi atribuído um maior preço pago pela saca (R\$ 1.500,00) e um menor custo de produção (R\$ 300,00), os valores de NDE chegaram a 40 %.

Coffea arabica

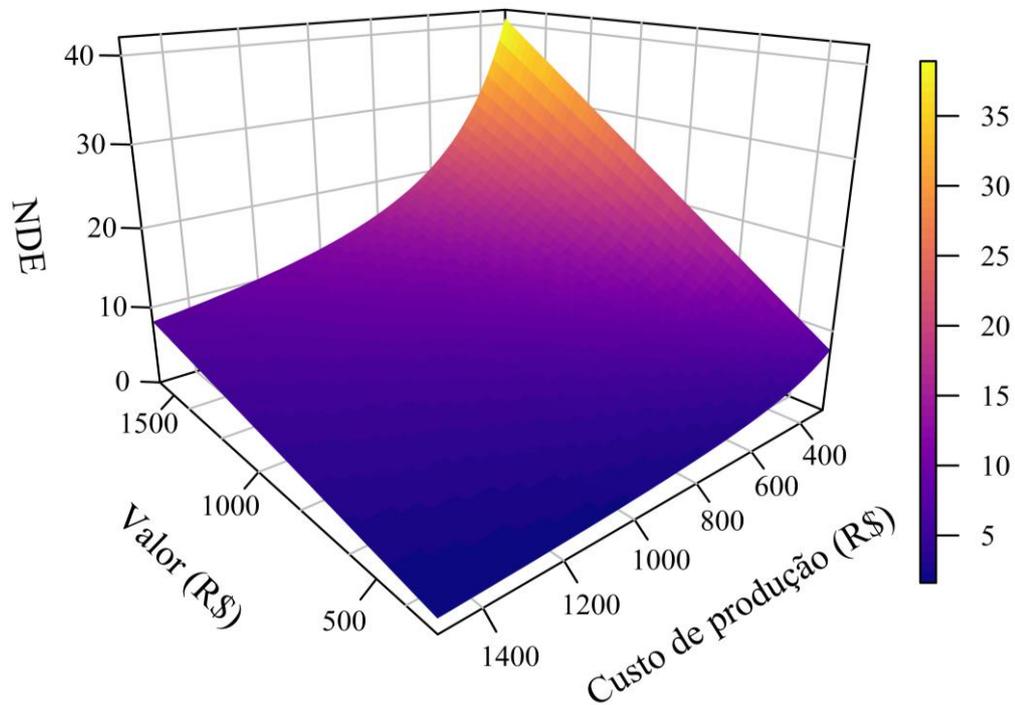


Figura 9. Nível de dano econômico em *Coffea arabica* em função dos valores recebidos por saca beneficiada de 60 kg e custo de produção por hectare.

Com os dados da infestação de frutos de café arábica (%) em coleta com um plano amostral utilizando a armadilha multifunil, em diferentes estágios fenológicos do cafeeiro, gerou-se um gráfico contemplando as fases fenológicas (i.e., flor, chumbinho, expansão, granação, maturação e pós-colheita) (Pezzopane et al. 2003; Aristizábal et al. 2017; Johnson et al. 2018; Souza et al. 2020b), em que os parâmetros citados obtiveram correlações de todas as combinações, sendo superiores a 90% e significativas com as capturas na armadilha ($P = 0,0003$). Na fase chamada de chumbinho não houve infestação de frutos, entretanto 113 brocas foram capturadas (Figura 10). No estágio de granação (chumbão), que marca o início dos níveis de infestação, constatou-se na amostragem um total de 1,4% de infestação (Figura 10). Esta infestação se mostrou crescente até a fase final de maturação, conhecido como passas, em que valores de 16,60% de infestação foram adquiridos (Figura 10). O maior e menor número de brocas coletadas nas armadilhas ocorreu no final do estágio de maturação (passas) e pós-colheita, chegando a 341 e 16 brocas respectivamente (Figura 10).

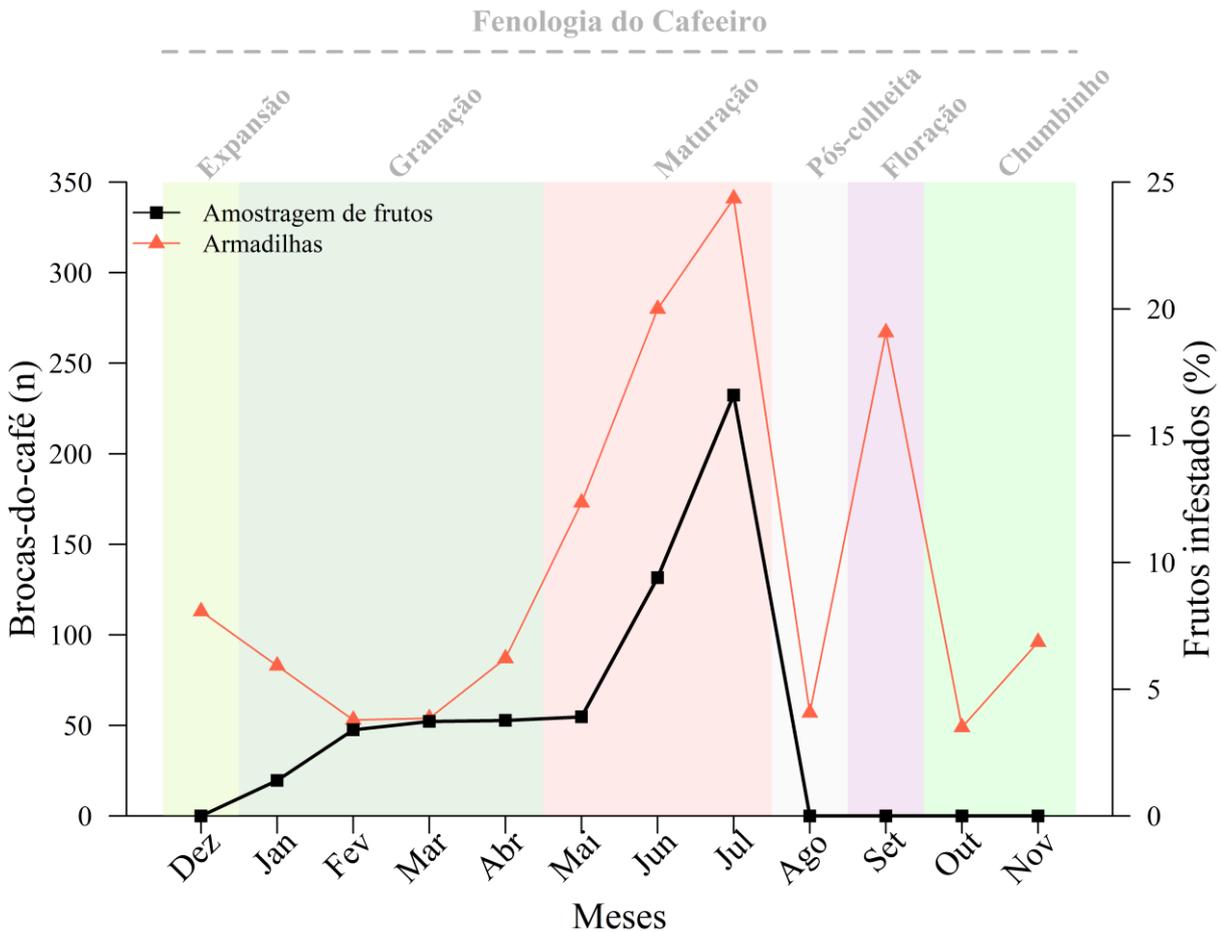


Figura 10. Infestação de frutos de café arábica (*Coffea arabica*) (%) e em coleta amostral convencional utilizando armadilha multifunil, iscada com etanol + metanol (1:1) para a broca-do-café, *Hypothenemus hampei*, em diferentes estágios fenológicos do cafeeiro.

4.4 Desenvolvimento do modelo de relação entre a taxa intrínseca de aumento natural (r) e a temperatura

O erro de ajuste médio quadrático relativo (RREs) da curva ajustada foi de 30%. De acordo com Soulsby e Thomas (2012), valores em torno de 29% fornecem ajustes razoavelmente bons. Ressalta-se em nosso estudo que o modelo se ajustou satisfatoriamente aos principais picos relacionados à dinâmica populacional (Figura 11).

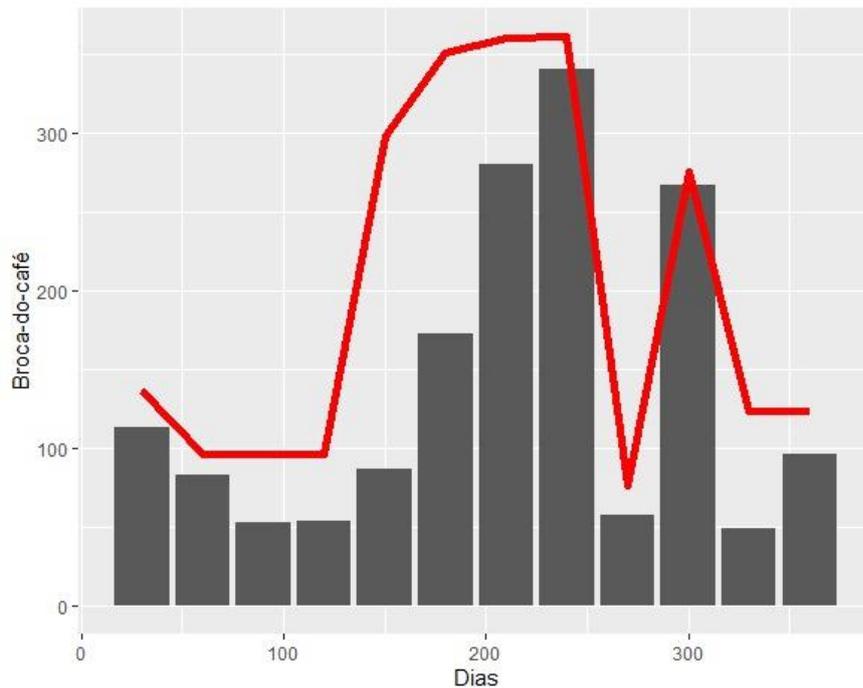


Figura 11. Simulação de modelo de dados de campo referentes ao número de capturas de fêmeas colonizadoras de *broca-do-café*, *Hypothenemus hampei*, em função do tempo. O gráfico de linha compreende a simulação do modelo, que apresenta um erro de ajuste médio quadrático relativo (RREs).

Os danos (%) correspondentes aos cenários simulados são apresentados a seguir. Todas as simulações foram baseadas em um método de controle com eficiência de 80%. Quando não se efetua nenhum método de controle, o nível de infestação chega a atingir os mesmos valores que um controle apenas no florescimento. A simulação de manejo com apenas uma aplicação de inseticida na fase de floração não reduziu os danos nos frutos, permanecendo com 3,5% (Figura 12). A simulação de manejo com aplicação de inseticida na fase de maturação reduziu os danos nos frutos fazendo a infestação passar de 3,5% para 1,8% (Figura 13). Dois cenários com duas aplicações em diferentes fases fenológicas também foram sugeridos. Efetuando controle na floração e maturação, os danos ficaram em 1,5% (Figura 14). Ao optar por duas aplicações, entretanto, na fase de expansão e maturação a eficiência foi de 1,8% (Figura 15). Um cenário exigindo três aplicações também foi elaborado, sendo utilizado o método de controle na floração, expansão e maturação, com os danos ficando em 1,5% (Figura 16).

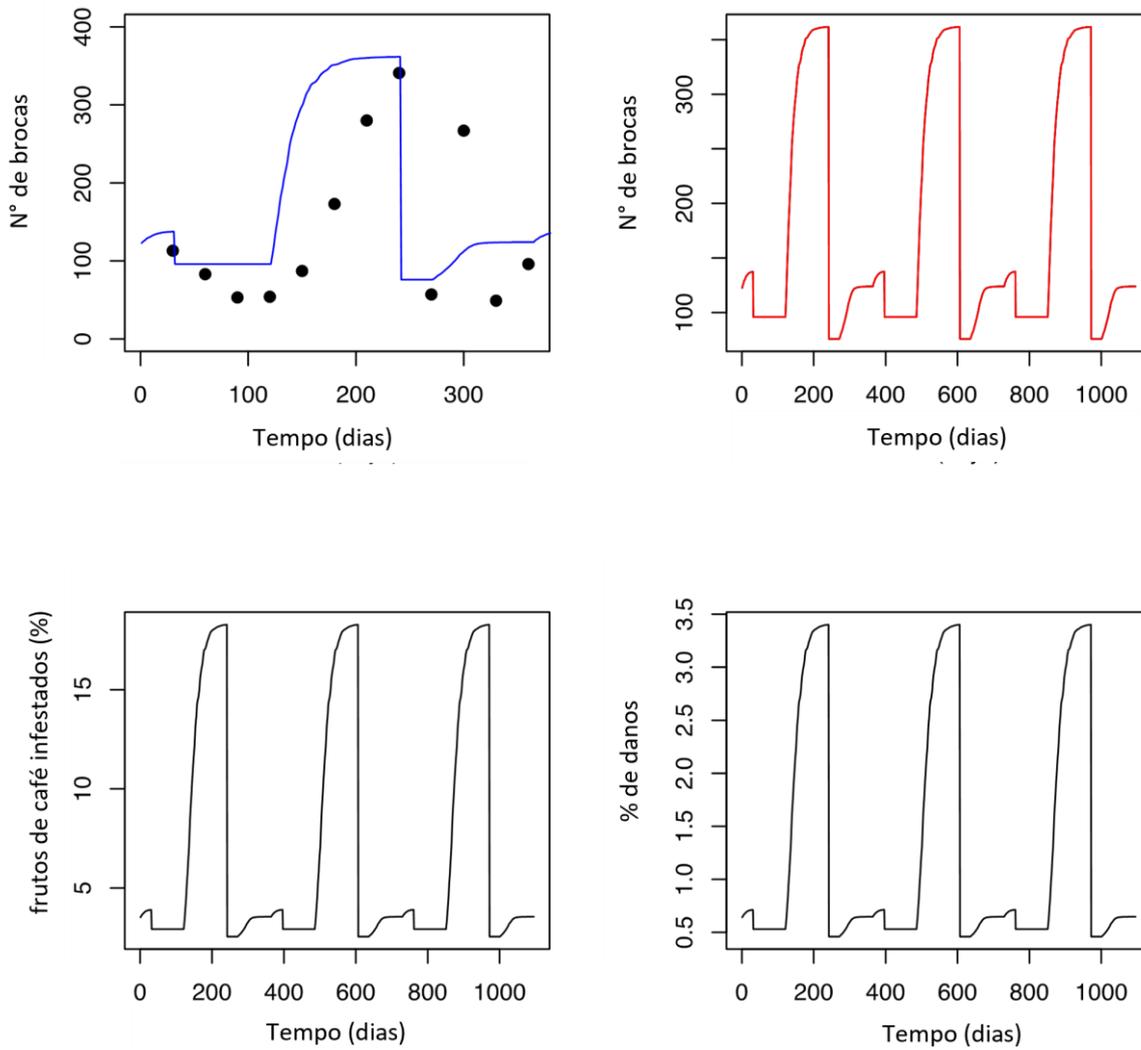


Figura 12. Simulação com aplicação de inseticida com eficiência de controle de 80% na fase de florescimento para a broca-do-café, *Hypothenemus hampei*.

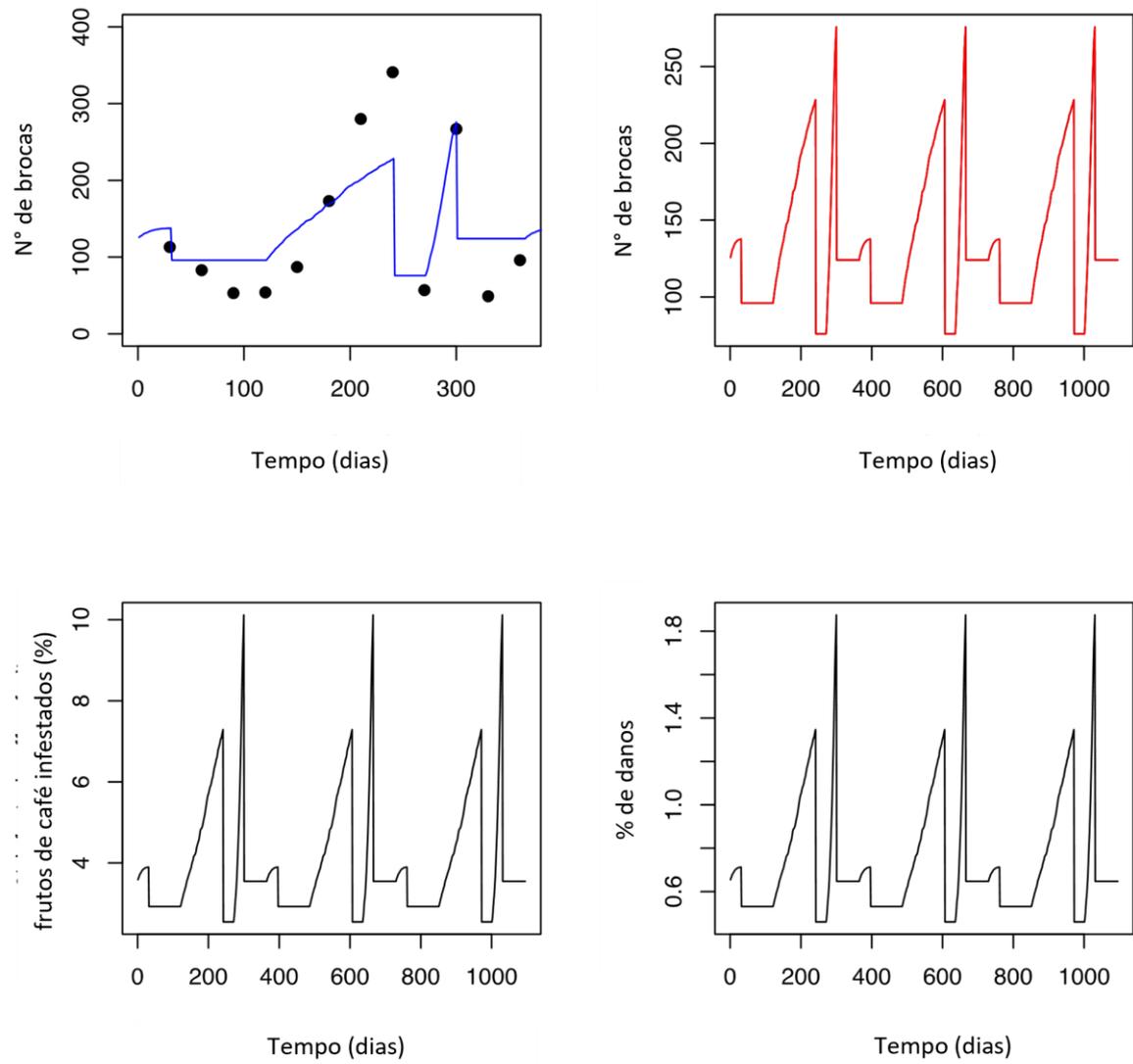


Figura 13. Simulação com aplicação de inseticida com eficiência de controle de 80% na fase de maturação para a broca-do-café, *Hypothenemus hampei*.

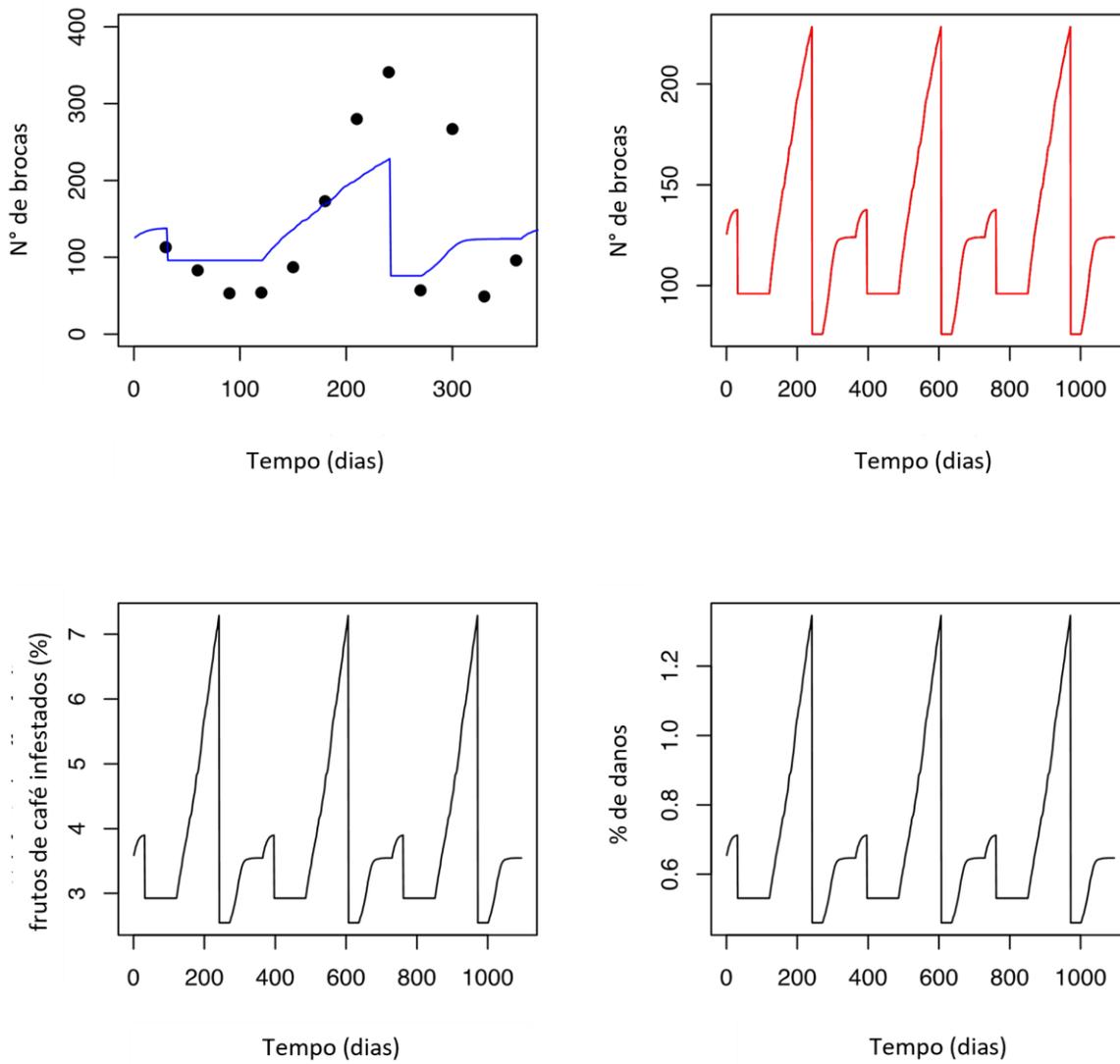


Figura 14. Simulação com aplicação de inseticida com eficiência de controle de 80% na fase de florescimento e maturação para a broca-do-café, *Hypothenemus hampei*.

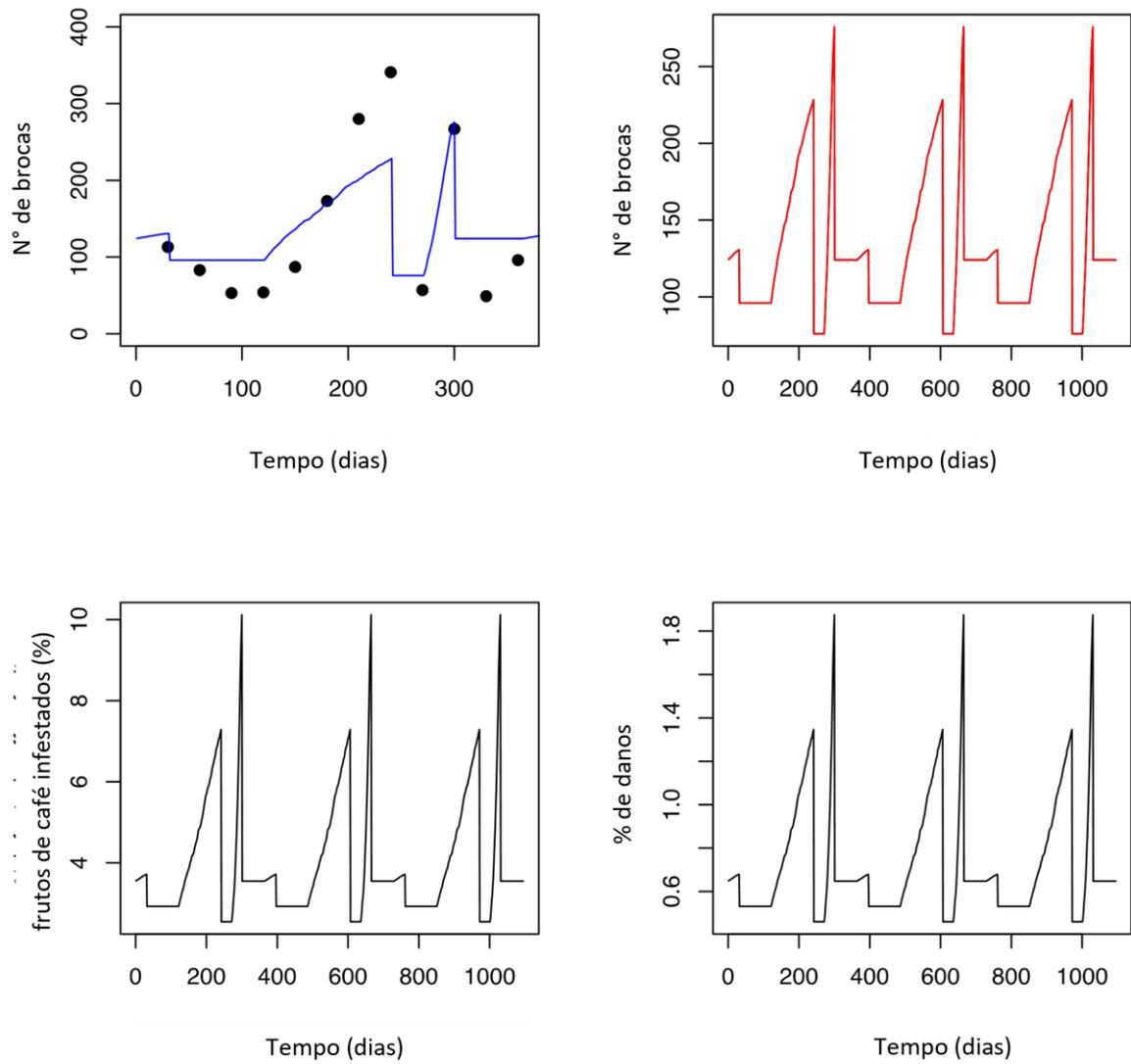


Figura 15. Simulação com aplicação de inseticida com eficiência de controle de 80% na fase de expansão e maturação para a broca-do-café, *Hypothenemus hampei*.

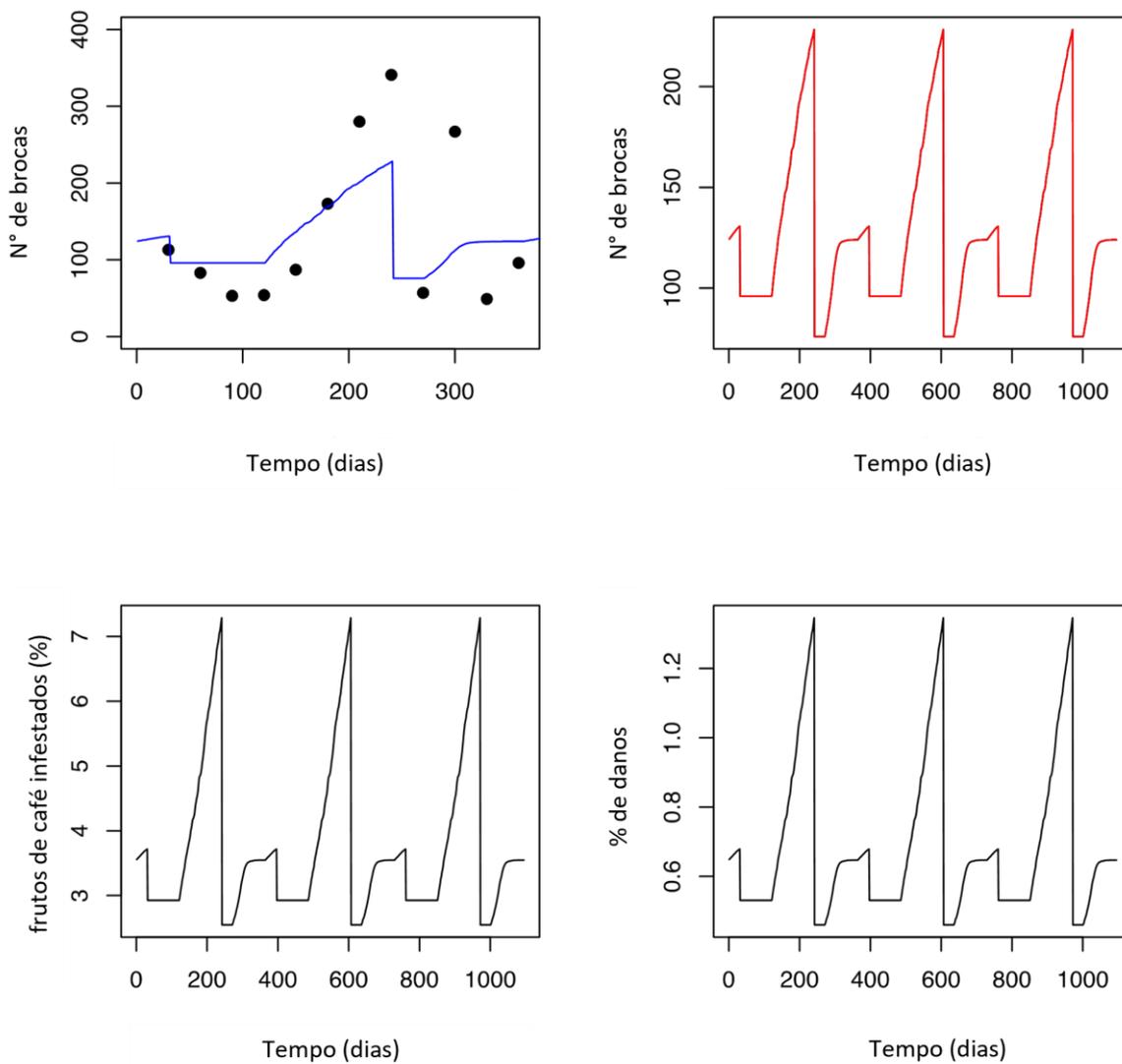


Figura 16. Simulação com aplicação de inseticida com eficiência de controle de 80% na fase de florescimento, expansão e maturação para a broca-do-café, *Hypothenemus hampei*.

5. DISCUSSÃO

5.1 Teste de seleção de modelos de armadilhas, determinação do raio de ação da armadilha e estimativa da densidade populacional absoluta de *Hypothenemus hampei* a partir de dados de armadilhas

A seleção de um modelo ideal de armadilha para capturar determinada espécie de inseto-praga é um processo complexo, devendo considerar critérios econômicos e ecológicos, além dos aspectos comportamentais do inseto-alvo (Howse et al. 1998). Diversos fatores podem afetar a eficiência de modelos de armadilha na captura de fêmeas de *H. hampei*, incluindo a altura de instalação da armadilha (Dufour e Frérot 2008; Uemura-Lima et al. 2010; Ruiz-Diaz e Rodrigues 2021), a dinâmica populacional do inseto nos diferentes estágios fenológicos da cultura (Souza et al. 2020b; Dufour et al. 2021), a cor da armadilha (Mathieu et al. 1997; Saravanan e Chozhan 2003; Dufour e Frérot 2008), o horário de voo do inseto (Souza et al. 2020a), fatores climáticos (Constantino et al. 2021) e os atraentes utilizados (Silva et al. 2006; Dufour e Frérot, 2008; Fernandes et al. 2014).

Os diversos modelos de armadilhas avaliados apresentaram desempenho semelhante em relação aos critérios de eficiência estabelecidos, capturando números equivalentes de fêmeas de *H. hampei* e de insetos não-alvo, com exceção ao modelo “lapar”. Este último modelo de armadilha é amplamente utilizado no Brasil devido seu baixo custo e facilidade de fabricação artesanal. Apesar de não diferir dos outros modelos avaliados em relação à captura de *H. hampei*, o modelo “lapar” intercepta maior quantidade de insetos de outras ordens e materiais indesejáveis, o que dificulta o serviço de triagem e identificação dos insetos coletados e, conseqüentemente, aumenta os custos de monitoramento (Zhong et al. 2018).

O modelo “Multifunil”, por sua vez, se mostrou o mais versátil em diversos aspectos, apresentando maior facilidade na montagem, instalação e avaliação, menor incidência de materiais indesejáveis na armadilha, além de possuir maior viabilidade de produção comercial em larga escala, em virtude da menor diversidade de componentes que constituem esta armadilha incluindo, basicamente, funis de dimensões idênticas, um telhado protetor e um recipiente coletor (Lindgren, 1983; Lindgren et al. 1983).

A área de amostragem efetiva da armadilha multifunil com isca de álcool para monitorar as fêmeas colonizadoras é de 0,17 ha. Este parâmetro baseou-se principalmente na distância máxima de voo de dispersão das fêmeas, dentro do raio da armadilha, e não no alcance da pluma da armadilha. Este padrão está de acordo com a baixa probabilidade de captura obtida, que ocorre quando a distância líquida percorrida por um inseto é significativamente maior que o alcance da pluma de odor (Miller, 2020). Aqui consideramos

a EAR (Byers, 1999) como sendo o alcance da pluma da armadilha de álcool, em que o EAR estimado está alinhado com vários outros estudos (ou seja, < 2 m), independentemente do modelo de armadilha e do tipo semioquímico (Schlyter, 1992; Byers, 1999; Miller et al. 2015) estar relacionado com suas propriedades físico-químicas.

Por exemplo, cairomônios derivados de plantas de baixo peso molecular, como os álcoois de cadeia curta, produzem plumas de odor que se difundem e desaparecem rapidamente no ambiente, dificultando a detecção pelas antenas do inseto que está distante do ponto de emissão (Gut et al. 2004). Além disso, mudanças diárias na velocidade do vento, temperatura e níveis de turbulência atmosférica podem afetar a estrutura da pluma de odor (Elkinton et al. 1984; Cardé e Willis, 2008). Por exemplo, à medida que as correntes de ar mudam de velocidade e direção, obstáculos vegetais, como os cafeeiros, podem alterar a pluma de semioquímicos (Turchin e Odendaal, 1996).

No entanto, embora não tenha sido possível medir a velocidade do vento no local experimental, a estação meteorológica mais próxima registrou uma velocidade do vento relativamente baixa durante o pico diário de voo da praga, ou seja, do final da manhã até o meio da tarde (Baker et al. 1992; Mathieu et al. 1997a). Além disso, a velocidade do vento provavelmente foi ainda menor dentro da parcela de café (Johnson e Manoukis, 2021), o que poderia ter atingido ou se aproximado de níveis ótimos (aproximadamente 1 m s^{-1}) para difusão e estabilidade da pluma de semioquímicos (Miller et al. 2015).

A taxa geral de recaptura dos insetos marcados foi baixa, diminuindo em função da distância liberada da armadilha central, corroborando à maioria dos estudos de marcação-liberação-recaptura (Turchin e Odendaal, 1996; Byers, 1999; Dodds e Ross, 2002; Miller et al. 2015; Adams et al. 2017a, Adams et al. 2017b; Meurisse e Pawson, 2017; Kirkpatrick et al. 2018, Kirkpatrick et al. 2019). Na verdade, o número de brocas marcadas e liberadas no estudo foi equivalente ou superior aos utilizados para outros scolytinae (Turchin e Odendaal, 1996; Dodds e Ross, 2002).

A mortalidade de brocas-do-café foi baixa antes ou durante as liberações, sendo improvável que a maioria das brocas marcadas como “desaparecidas” tenham morrido durante os próximos 3 dias de experimentos. Esses besouros podem sobreviver por 10 dias sem alimento (Mathieu et al. 1997a) e encontrar refúgio nos frutos secos restantes do café ou em outros tecidos do cafeeiro (Vega et al. 2015). Além disso, a mortalidade de brocas marcadas com o pó fluorescente mostrou-se semelhante à não marcadas, por exemplo, apenas 5%, 3 dias após a pulverização (Acevedo-Bedoya et al. 2009). Ademais, a linha ajustada para a proporção não transformada de recaptura pela distância de liberação revelou que *H. hampei* se move aleatoriamente no campo e que as distâncias de liberação foram escolhidas apropriadamente (Miller et al. 2015).

Finalmente, a probabilidade geral de captura em liberações na direção cardinal tem sido semelhante à de liberações feitas em outros estudos (Adams et al. 2017b), indicando assim a adequação de nosso desenho experimental. Portanto, além do fraco poder de atração da armadilha com álcool, dois outros fatores importantes podem ter contribuído para as baixas taxas de recaptura. Primeiro, as fileiras de cafeeiros podem ter afetado a direção de dispersão das brocas marcadas, já que os besouros poderiam pousar nesses obstáculos logo após decolarem e depois retornarem ao voo em direções aleatórias (Byers, 1999). Por exemplo, a maioria das recapturas ocorreu nas primeiras 24 horas após a soltura, e todas as recapturas nas distâncias de 8, 12 e 16 m ocorreram durante este período. Desta forma, a maioria dos besouros que voaram provavelmente já haviam se dispersado para fora do alcance de atração da armadilha após 24 horas (Schlyter, 1992). Em segundo lugar, utilizamos brocas recém-emergidas para experimentos e a maioria delas, embora ainda não confirmado, poderiam necessitar de um período prévio de voo adaptativo, de maneira a se tornarem responsivas à armadilha de álcool. Por exemplo, besouros escolitinos xilófagos e saprófitos com experiência de voo exibiram uma resposta quimiotática relativamente imediata a armadilhas de semioquímicos em comparação com besouros recém-emergidos (Duelli et al. 1997; Byers, 1999; Meurisse e Pawson, 2017).

Devido às maiores reservas de lipídios e glicogênio nos indivíduos do último grupo, eles poderiam prolongar o período de voo e conseqüentemente dispersar-se para fora da vizinhança da armadilha com semioquímicos (Duelli et al. 1997; Byers, 1999). Este voo adaptativo pode durar de minutos a horas, onde parece ocorrer a transição do comportamento de orientação fotostática para quimiotrópica (Duelli et al. 1997; Byers, 1999; Meurisse e Pawson, 2017). Embora os cafeeiros possam encurtar a duração dos voos contínuos, a capacidade dispersiva da broca é relativamente modesta. Por exemplo, este besouro foi registrado infestando frutos de café em árvores a 40 m do ponto de liberação após 24 horas, sob a mesma velocidade de vento do presente estudo (Gil et al. 2015). Isto é, paralelo às observações laboratoriais de brocas, voando continuamente por mais de 22 minutos antes do primeiro pouso e exibindo voos sucessivos por até 3 horas (Baker, 1984). Além disso, foi demonstrado que fêmeas de *H. hampei* usam cafeeiros como pontes para se dispersarem através de plantações de café conectadas (Avelino et al. 2012), permitindo assim que esses besouros alcancem dezenas a centenas de metros (Baker, 1984; Gingerich et al. 1996; Mathieu et al. 1999; Gil et al. 2015).

Além disso, o fato de uma pequena porcentagem de brocas ter ficado presa em alturas entre 2,5 e 3,5 m acima do solo (Ruiz-Diaz e Rodrigues, 2021), também indica que esses besouros podem voar para cima em direção aos cafeeiros, de onde provavelmente poderiam se dispersar por distâncias maiores, auxiliadas por correntes de vento. No entanto, ainda não pretendemos estimar a capacidade dispersiva da praga. Isso poderia ser feito

liberando besouros marcados no centro de anéis concêntricos de armadilhas com semioquímicos, onde são adotados um número variável de armadilhas por anel e distâncias do ponto de liberação (Turchin e Odendaal, 1996; Byers, 1999; Poland et al. 2000; Meurisse e Pawson, 2017). Além de que, o primeiro anel deve ter o menor número de armadilhas e estar adequadamente espaçado do ponto de liberação, evitando assim a interferência das armadilhas pela sobreposição de plumas que poderia subestimar as recapturas e direcionar as capturas para os anéis mais próximos (Turchin e Odendaal, 1996; Byers, 1999).

No entanto, nossa área amostral estimada sugere o uso sete armadilhas ha⁻¹ para monitoramento da broca-do-café, o que é inferior à média de 19 armadilhas/ha (variação de 2 a 59 armadilhas/ha) que foram relatadas em outros estudos (Mathieu et al. 1999; Fernandes et al. 2011; Pereira et al. 2012; Aristizábal et al. 2015, Aristizábal et al. 2017; Johnson et al. 2018; Souza et al. 2020; Johnson e Manoukis, 2020, Johnson e Manoukis 2021). Isto é economicamente desejável, desde que reduza custos com armadilhas, atrativos e tempo de mão de obra para amostragem da praga.

Outra abordagem crítica no presente estudo foi estimar a densidade populacional da praga utilizando dados de captura. Mostramos que capturar uma broca por armadilha/ha equivale a uma densidade populacional provável de 565 besouros da mesma espécie/ha. Este resultado pode ser atribuído ao fato de que a maioria das brocas marcadas e liberadas não foram recapturadas, conforme relatado acima. A partir disso, capturar 100 brocas em uma armadilha, na fase inicial de enchimento dos grãos de café Arábica, ou seja, 120 dias após a floração (Ruiz-Cárdenas e Baker, 2010; Vega et al. 2015), equivale aproximadamente a 56.530 brocas/ha.

Consequentemente, as perdas projetadas na colheita chegariam a cerca de 4,5%, considerando o rendimento médio brasileiro de café arábica verde, ou seja, 1.330 kg/ha (Companhia Nacional de Abastecimento, 2022). No Brasil, o limite econômico da praga é de 4,3% de frutos de café infestados/ha, correspondendo a 400 brocas/ha no período de floração (Fernandes et al. 2011). Nossas estimativas, por outro lado, indicam que esse limite pode ser alcançado com aproximadamente 95 fêmeas colonizadoras capturadas/ha, o que equivale a perdas admitidas abaixo de 57 kg de grãos de café verde/ha.

No entanto, estas estimativas de danos ainda precisam de análise com a progressão real da infestação de frutos no campo (por exemplo, Baker e Barrera, 1993), devendo ser adotadas com cautela. As presentes conclusões lançam uma nova luz sobre a melhoria na utilização de armadilhas com etanol + metanol e na interpretação dos dados de captura para um melhor manejo da broca-do-café.

5.2 Determinação do nível de dano econômico e desenvolvimento do modelo de relação entre a taxa intrínseca de aumento natural (r) e a temperatura

O nível de dano econômico (NDE) é a menor densidade populacional de um inseto que causará danos econômicos em uma cultura (Stern et al. 1959). Os surtos esporádicos ou frequentes de uma praga podem persistir por vários anos, contribuindo para que estes níveis aumentem ou diminuam (King et al. 1981; Ferguson et al. 2019). Os fatores atrelados ao aumento ou diminuição da população de um inseto podem ser de origem química, física e biológica (Bayley et al. 2018; Villegas et al. 2021; Nguyen et al. 2021).

Para monitoramento de populações de insetos, as amostragens com armadilhas são fundamentais e podem informar correlações precisas no MIP (Ding e Taylor, 2016; Murtaza et al. 2019; Rydhmer et al. 2022;). Uma ferramenta frequentemente utilizada com os dados das capturas de armadilhas é a correlação entre insetos capturados e o nível de infestação, onde gráficos são plotados e a função de melhor ajuste é escolhida. Ao correlacionar o nível de infestação de *H. hampei* com a perda de massa de grãos, o modelo linear foi o que melhor se ajustou. Sabendo que existe uma correlação positiva entre a captura em armadilhas e o nível de infestação, que por sua vez, responde linearmente a perda de massas de grão, evidencia-se que quanto maior o número de insetos capturados, maior a perda de rendimento dos grãos.

Fernandes et al. (2010) verificaram que existe uma relação linear entre as capturas de *H. hampei* e o nível de infestação, todavia não correlacionaram com a perda de massa de grãos. Outras pragas também apresentam o mesmo comportamento de infestação, como no estudo visando detectar o NDE de *Tuta absoluta* Meyrick (Lepidoptera: Gelechiidae) em tomateiro, em que se verificou que o número de indivíduos atacando a cultura está linearmente correlacionada com a perda de rendimento (Abbes e Chermiti, 2018), e no estudo visando detectar a perda de rendimento ocasionado por *Spodoptera exigua* (Hübner) (Lepidoptera: Noctuidae) na cultura do repolho, em que o mesmo comportamento linear foi detectado (Kim et al. 2009).

Os parâmetros fundamentais para realizar o cálculo do NDE englobam a perda de rendimento da cultura, o valor de mercado da cultura e a eficiência do método de controle empregado (Pedigo et. al 1986; Pedigo e Rice, 2006). Nos sistemas convencionais de produção de café geralmente adotam-se inseticidas com eficiência ($k=0,80$), considerada alta, e com baixo custo por hectare (Fernandes et al. 2011). A perda de rendimento da cultura em função do nível de infestação da praga é extremamente variável podendo ocasionar perdas superiores a 50% (Suswati et al. 2020; Supriyatdi e Erfandari, 2022).

O valor de mercado do café beneficiado geralmente é comercializado em sacas de 60 kg, com o valor oscilando frequentemente ao longo da história, assim como o custo de produção (Bongase, 2017; Krishnan, 2017). Esses fatores afetam diretamente o NDE, como demonstrado em nossos resultados, em que o nível de dano econômico variou de 1,5 a 40% de frutos infestados. Estes resultados permitem que os cafeicultores, por meio do seu custo de produção e valor recebido pela saca do café, identifiquem o nível de dano econômico a ser adotado.

Os níveis de dano econômico podem ser correlacionados com a captura em armadilhas (Tingle e Mitchell, 1981; Shipp et al. 2000; Vayssières et al. 2009), entretanto, esta correlação para ser precisa, depende de uma amostragem do inseto para cada estágio fenológico da cultura. Nossos resultados de correlação entre nível de infestação e capturas por armadilha concluem que os danos nos frutos ocorrem da expansão até a fase de maturação. A ausência de infestação nas fases de floração e chumbinho é relatada em estudos, devido à ausência de fruto ou pelo alto grau de umidade do grão, como sendo prejudicial ao desenvolvimento da praga (Mathieu et al. 1999; Jaramillo et al. 2006; Souza et al. 2020b).

Mesmo na ausência de infestação, aplicações de insumos na chamada época de trânsito da broca (pós-colheita, floração e chumbinho), poderiam reduzir o inóculo inicial da praga e conseqüentemente diminuir infestações futuras. De fato, ao realizar a técnica de repasse, que consiste na coleta de frutos perdidos da safra anterior, os números de frutos infestados tendem a ser reduzidos (Bustillo et al. 1998; Aristizábal et al. 2011; Infante, 2018;), e realizando a aplicação de inseticidas na fase de transição da praga, antes da mesma penetrar no fruto, ocorre redução do nível de infestação (Souza et al. 2020c; Krohling et al. 2021).

Estudar a dinâmica populacional de uma praga e aplicar métodos de controles preventivos podem aumentar o sucesso no MIP (Campbell e Arbogast, 2004; Bonadiman et al. 2018; Marcano et al. 202). Estudos de dinâmica populacional da praga e o conhecimento de parâmetros biológicos podem resultar em modelos computacionais aplicados (Shoemaker, 1981; Perevaryukha, 2019). A utilização destes modelos vem crescendo nos últimos anos, tornando-se ferramenta importante no MIP, descrevendo processos ecológicos ou prevendo tendências (Malaquias et al. 2017; Garcia et al. 2021; Wang et al. 2022). Um modelo visando determinar infestações futuras de *H. hampei*, utilizando números de armadilhas inadequadas por área amostrada, podem gerar previsões imprecisas.

Nosso modelo além de sugerir uma quantidade ideal de armadilhas por hectare (item 4.2), incluiu dados biológicos da praga considerando a variação de temperatura do local de estudo (Toledo et al. 1947). Embora os insetos sejam poiquilotérmicos, a maioria dos modelos não inclui este fator, podendo subestimar ou superestimar as previsões (Garcia

et al. 2019). De forma geral, o modelo sem adotar medidas de controle, detectou picos populacionais da praga frequentemente observados em estudos de dinâmica populacional (Ferreira et al. 2000; Dufour et al. 2021; Botelho et al. 2020), sendo encontradas pequenas variações provenientes do estágio de desenvolvimento fenológico da cultura, que varia de acordo com região agrícola.

O modelo foi capaz de prever que ao detectar a presença do inseto na armadilha, surtos da praga sempre acontecerão, entretanto, dois períodos de surtos maiores foram previstos para as fases de florescimento e maturação, este último seria ainda mais intenso. As premissas inseridas no modelo assumem que a temperatura é o fator determinante que governa a dinâmica populacional, mas outros fatores também influenciam, como as fases fenológicas e sua capacidade de suporte, e a eficiência de algum fator de mortalidade ao inseto (Garcia et al. 2019). Com o modelo aferido, situações de manejo foram simuladas e, ao simular apenas uma aplicação como método de controle, a única que se mostrou eficiente na redução da infestação foi a realizada na maturação.

A utilização de controle na floração que compreende o segundo maior surto não surtiu efeito na redução dos níveis de infestação. Muitos estudos, visando o controle de *H. hampei* com inseticidas, recomendam que a aplicação ocorra na fase de granação e próximo ao ponto de maturação fisiológica, evitando o abortamento de frutos pela planta (Teixeira et al. 2006). Nosso modelo sugere que ao adotar uma única aplicação para o controle da praga, este deve ser exclusivamente no surgimento dos primeiros frutos maduros. Para se utilizar apenas uma aplicação para o manejo da praga é importante mencionar o hábito críptico do inseto (Guide et al. 2018; Botti et al. 2022).

Nas décadas passadas com o inseticida endossulfan, organofosforado banido do mercado, não existia diferença na eficiência do produto entre uma e duas aplicações, e até mesmo insetos dentro dos frutos eram mortos (Ingram, 1968). Todavia, para os inseticidas atuais demonstrarem a mesma eficiência no manejo de *H. hampei* é importante que entrem em contato ou sejam ingeridos pelo inseto, vindo a morrer posteriormente (Plata-Rueda et al. 2019). Ao buscar reduzir ainda mais os níveis de infestação, sugere-se em nosso modelo um manejo com duas ou três possíveis aplicações de inseticidas (Figuras 14, 15 e 16).

Verifica-se que ao utilizar duas aplicações, compreendidas na fase de expansão e maturação, há a mesma eficiência de uma única aplicação na fase de maturação (Figura 12). Os melhores resultados foram encontrados quando se utilizou duas aplicações na fase de floração e maturação (Figura 14). O cenário com três aplicações na floração, expansão e maturação, obteve o mesmo resultado que duas aplicações no melhor cenário, se tornando inviável pelo maior custo de controle. Nossos melhores resultados coincidentemente estão inseridos em fases de grande atenção na aplicação de produtos fitossanitários em lavouras cafeeiras.

Na floração existem grandes números de insetos benéficos ao agroecossistema, incluindo polinizadores, inimigos naturais das pragas e uma diversidade de espécies nativas que buscam recursos alimentares (Dufour et al. 2021; Manson et al. 2022). A aplicação de produtos fitossanitários, mesmo que sejam seletivos ou de baixo risco ao meio ambiente, não devem ser aplicados durante o processo pleno de floração.

Desta forma, recomendamos que a aplicação seja realizada na pós-florada, e no período vespertino, horário que apresenta menor forrageamento da maioria das abelhas nativas (Boti et al. 2005) e maior atividade de voo da praga (Leefmans, 1923; Dufour et al. 2021). A aplicação referente a fase fenológica de maturação envolve o cuidado de respeitar o período de carência, em que a maioria dos princípios ativos recomendados para a praga sugerem respeitar um intervalo de segurança de até 60 dias. Desta forma, a recomendação é optar pela aplicação nos primeiros frutos em estágio verde cana, que marcam o início da maturação (Pezzopane et al. 2003), e utilizar princípios ativos com baixo intervalo de segurança, entre eles os bionseticidas formulados a base de *B. bassiana*.

Este estudo detalha importantes pontos acerca do monitoramento de *H. hampei* utilizando semioquímicos. Demonstramos que o nível de dano econômico varia em função de alguns fatores e que a dinâmica populacional pode servir para aferir modelos computacionais de previsão, que por sua vez, indicam as melhores fases fenológicas para realizar o controle químico.

6. CONCLUSÕES

O presente estudo demonstrou que o modelo de armadilha afeta a captura de insetos não-alvo e que o raio de ação de uma armadilha interfere diretamente na área de captura de fêmeas colonizadoras de *H. hampei*. Além disso, nosso modelo de relação entre a taxa intrínseca de aumento natural e a temperatura demonstraram que as táticas de manejo populacional, durante as fases de floração e maturação, foram as que obtiveram melhor resultado. Outros estudos utilizando as metodologias aqui propostas são encorajados, levando em consideração novos modelos de armadilha, novos atrativos, além de diferentes sistemas de cultivo.

REFERÊNCIAS

ABBES, K.; CHERMITI, B. Comparison of two marks of sex pheromone dispensers commercialized in Tunisia for their efficiency to monitor and to control by mass-trapping *Tuta absoluta* under greenhouses. Tunis. **Journal of Plant Protection**, v. 6, n. 2, p. 133-148, 2011.

ACEVEDO-BEDOYA, F.E.; GIL-PALACIO, Z. N.; BUSTILLO-PARDEY, A. E.; MONTOYA-RESTREPO, E. C.; BENAVIDES-MACHADO, P. Evaluación de marcadores físicos y moleculares como herramientas para el estudio de la dispersión de *Hypothenemus hampei*. **Cenicafé**, v. 60, p. 72-85, 2009.

ADAMS, C. G.; J. H. SCHENKER, P. S.; MCGHEE, L. J.; GUT, J. F.; BRUNNER, J. R. MILLER. Maximizing information yield from pheromone-baited monitoring traps: estimating plume reach, trapping radius, and absolute density of *Cydia pomonella* (Lepidoptera: Tortricidae) in Michigan apple. **Journal of Economic Entomology**, v. 110, n. 2, p. 305-318, 2017.

ALBA-ALEJANDRE, I.; ALBA-TERCEDOR, J.; VEGA, F. E. Observing the devastating coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*) inside the coffee berry using micro-computed tomography. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, p. 17033, 2018.

AGRESTI, P. D. M.; FRANCA, A. S.; OLIVEIRA, L. S.; AUGUSTI, R. Discrimination between defective and non-defective Brazilian coffee beans by their volatile profile. **Food Chemistry**, v. 106, n. 2, p. 787-796, 2008.

ANDRADE, S. C.; ROSSI, G. D.; MARTINELLI, N. M. Dispersion pattern of giant cicada (Hemiptera: Cicadidae) in a Brazilian coffee plantation. **Environmental Entomology**, v. 49, n. 5, p. 1019-1025, 2020.

ARISTIZÁBAL, L. F.; JIMÉNEZ, M.; BUSTILLO, A. E.; ARTHURS, S. P. Monitoring cultural practices for coffee berry borer *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) management in a small coffee farm in Colombia. **The Florida Entomologist**, v. 94, n. 3, p. 685-687, 2011.

ARISTIZÁBAL, L. F.; JIMÉNEZ, M.; BUSTILLO, A. E.; TRUJILLO, H. I.; ARTHURS, S. P. Monitoring coffee berry borer, *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Curculionidae), populations with alcohol-baited funnel traps in coffee farms in Colombia. **Florida Entomologist**, v. 98, n. 1, p. 381-383, 2015.

ARISTIZÁBAL, L. F.; JOHNSON, M.; SHRINER, S.; HOLLINGSWORTH, R.; MANOUKIS, N. C.; MYERS, R.; ARTHURS, S. P. Integrated pest management of coffee berry borer in Hawaii and Puerto Rico: Current status and prospects. **Insects**, v. 8, n. 4, p. 123, 2017.

BABU, P. Value chain upgrading strategies for integration of indian small coffee growers in global coffee value chain. **Economic Affairs**, v. 64, n. 4, p. 295585, 2019.

BARRERA, J.F. Investigación sobre la broca del café en México: logros, retos y perspectivas. in: Simposio sobre la situación actual y perspectivas de la investigación y manejo de la broca del café en costa rica, cuba, guatemala y méxico, 2005, Tapachula. **Anais... Tapachula: Sociedad Mexicana de Entomología**, p. 1–13, 2005.

BAYLEY, J. S.; WINTHER, C. B.; ANDERSEN, M. K.; GRONKJAER, C.; NIELSEN, O. B.; PEDERSEN, T. H.; OVERGAARD, J. Cold exposure causes cell death by depolarization-mediated Ca²⁺ overload in a chill-susceptible insect. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 115, n. 41, p. E9737-E9744, 2018.

BAVARESCO, A.; GARCIA, M. S.; BOTTON, M.; NONDILLO, A. Efeito da altura de posicionamento e da cor de armadilhas de feromônio na captura de *Argyrotaenia sphaleropa* (Meyrick, 1909) (Lepidoptera: Tortricidae) na cultura do caquizeiro. **Arquivos do Instituto Biológico**, v. 72, p. 373-377, 2002.

BEILHE, L. B.; ROUDINE, S.; PEREZ, J. A. Q.; ALLINNE, C.; DAOUT, D.; MAUXION, R.; CARVAL, D. Pest-regulating networks of the coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*) in agroforestry systems. **Crop Protection**, v. 131, p. 105036, 2020.

BERNAYS, E. A.; CHAPMAN, R. F. Host-plant selection by phytophagous insects. **Plant Science**, v. 102, n 1, p. 117-118, 1994.

BAKER, P.S. The coffee berry borer in Colombia. Final report of the DFID- Cenicafé-CABI Bioscience IPM for coffee project. Chinchiná. (Colombia), **DFID – CENICAFÉ**, 1999. 154p.

BAKER, P.S., LEY, C.; BALBUENA, R.; BARRERA, J. F. Factors affecting the emergence of *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Scolytidae) from coffee berries. **Bulletin of Entomological Research**, v. 82, p. 145-150, 1992.

BERTHET, J. A. Caruncho do café. **Boletim de Agricultura**, v. 14, p. 312-313, 1913.

BERNAYS, E. A.; CHAPMAN, R. F. Host-plant selection by phytophagous insects. **Contemporary Topics in Entomology 2**. New York: Chapman & Hall, 1994. p. 14-54.

BERGAMIN, J. O repasse como método de controle da broca do café *Hypothenemus hampei* (Ferr., 1867) (Col. Ipidae). **Arquivos do Instituto Biológico (Brasil)** v. 15 p. 197-208, 1944.

BRAINER, M. S. D. C. P.; XIMENES, L. F. Produção e mercado do café. 2021. Disponível em <<https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/handle/123456789/1108>> acesso em 13 de abril de 2022.

BLASSIOLI-MORAES, M. C.; MICHEREFF, M. F. F.; MAGALHÃES, D. M.; MORAIS, S. D.; HASSEMER, M. J.; LAUMANN, R. A.; BORGES, M. Influence of constitutive and induced volatiles from mature green coffee berries on the foraging behaviour of female coffee berry borers, *Hypothenemus hampei* (Ferrari)(Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae). **Arthropod-Plant Interactions**, v. 13, n. 3, p. 349-358, 2019.

BONADIMAN, P. A.; JUNIOR, J. L. F.; MADALON, F. Z.; CARVALHO, J. R.; GARCIA, A. D. B.; PRATISSOLI, D.; PREZOTTI, L. *Meronicidius intermedius* (Orthoptera: Tettigoniidae): Incidence and Analysis of Fruits Attacked in Banana Crops in the State of Espírito Santo, Brazil. **Journal of Experimental Agriculture International**, v. 28, n. 3, p. 1-8, 2018.

BONGASE, E. D. Impacts of climate change on global coffee production industry. **African Journal of Agricultural Research**, v. 12, p. 1607-1611, 2017.

BOTI J.B.; CAMPOS L.A.O.; MARCO JR. P.; FARIA V.M. Influência de Fragmentos Florestais na Polinização da Goiabeira. **Revista Ceres**, v.52, n 304, p. 863 – 874, 2005.

BOTTI, J. M. C.; MARTINS, E. F.; FRANZIN, M. L.; VENZON, M. Predation of coffee berry borer by a green lacewing. **Neotropical Entomology**, v. 51, n. 1, p. 160-163, 2022.

BOTELHO, J. F.; QUEIROZ, R. S. D.; ANJOS, M. R. D.; SOUZA, M. S. D. Population dynamics of *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Scolytidae) in agroforestry and monoculture systems of conilon coffee in the southern portion of the state of Amazonas, Brazil. **Revista Árvore**, v. 45, 2020.

BURBANO, E.; WRIGHT M.; BRIGHT D. E.; VEGA F.E. New record for the coffee berry borer, *Hypothenemus hampei*, in Hawaii. **Journal of Insect Science (Online)**. 2011.

BUSTILLO, A. E.; CÁRDENAS, R.; VILLALBA, D. A.; BENAVIDES, P.; OROZCO, J.; POSADA, F. J. **Manejo integrado de la broca del café *Hypothenemus hampei* (Ferrari) en Colombia**. Centro Nacional de Investigaciones de Café (CENICAFE): Chinchiná, Colombia, 1998.

BYERS, J. A. Host-tree chemistry affecting colonization in bark beetles. In: Cardé, R.T.; Bell, W. J. (Eds.). *Chemical ecology of insects 2*. Chapman & Hall, New York, NY, USA, 1999. p. 154–213.

CAMPBELL, J. F.; ARBOGAST, R. T. Stored-product insects in a flour mill: population dynamics and response to fumigation treatments. **Entomologia Experimentalis et Applicata**, v. 112, n. 3, p. 217-225, 2004.

CARDÉ, R. T. Navigation Along Windborne Plumes of Pheromone and Resource-Linked Odors. **Annual Review of Entomology**, v. 66, p. 317-336, 2021.

CAMILO, J.E.; OLIVARES, F.F.; JIMÉNEZ, H.A. Fenología y reproducción de la broca del café (*Hypothenemus hampei* Ferrari) durante el desarrollo del fruto. **Agronomía Mesoamericana**, Alajuela, v. 14, n. 1, p. 59-63, 2003.

COSTA, G.F.; FARIA, C.A. Por qué fêmeas da broca do café perfuram preferencialmente a coroa dos frutos?. **Academia Insecta**, Viçosa, v. 1, n. 1, p. 1-4, 2001.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira de café. Safra 2022 - n.1 - Primeiro Levantamento | Janeiro 2022. Disponível em: < <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe>>. Acesso em: 13 abril. 2021.

CONSTANTINO, L. M.; NAVARRO, L., BERRIO, A.; ACEVEDO, F. E.; RUBIO, D.; BENAVIDES, P. Biologic, morphologic, and genetic aspects of *Hypothenemus obscurus* and *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae). **Revista Colombiana de Entomología**, v. 37, n. 2, p. 173-182, 2011.

CONSTANTINO, L. M.; GIL, Z. N.; MONTOYA, E. C.; BENAVIDES, P. Coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*) emergence from ground fruits across varying altitudes and climate cycles, and the effect on coffee tree infestation. **Neotropical Entomology**, v. 50, n. 3, p. 374-387, 2021.

CORREA, L. R. B.; SANTA-CECILIA, L. V. C.; SOUZA, B.; CIVIDANES, F. J. Heat requirements of the white mealybug *Planococcus citri* (Risso, 1813) (Hemiptera: Pseudococcidae) on coffee plants. **Arquivos do Instituto Biológico**, v. 75, p. 53-58, 2021.

CRUZ-LÓPEZ, L.; DÍAZ-DÍAZ, B.; ROJAS, J. C. Coffee volatiles induced after mechanical injury and beetle herbivory attract the coffee berry borer and two of its parasitoids. **Arthropod-Plant Interactions**, v. 10, p. 151-159, 2016.

DAMON, A. A review of the biology and control of the coffee berry borer *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Scolytidae). **Bulletin of Entomological Research**, 90, p. 453–465, 2000.

DEEPIKA, M.; JYOTISHI, A. Assessing risk and risk mitigation strategies of small coffee growers: **A study of Kodagu district in Karnataka**, 2021.

DEWI, T. S. K.; SUPRAPTI, E.; RAHMAN, S. F. The effect of *Beauveria bassiana* on the effectiveness of *Nicotiana tabacum* extract as biopesticide against *Hypothenemus hampei* to robusta coffee. **International Journal of Technology**, v. 10, n. 1, p. 159-166, 2019.

DING, W.; TAYLOR, G. Automatic moth detection from trap images for pest management. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 123, p. 17-28, 2016.

DODDS, K. J.; ROSS, D. W. Sampling range and range of attraction of *Dendroctonus pseudotsugae* pheromone-baited traps. **The Canadian Entomologist**, v. 134, p. 343-355, 2002.

DUELLI, P.; ZAHRADNIK, P.; KNIZEK, M.; KALINOVA B. Migration in spruce bark beetles (*Ips typographus* L.) and the efficiency of pheromone traps. **Journal of Applied Entomology**, v. 121, p. 297-303, 1997.

DUFOUR, B. Importance of trapping for integrated management (IPM) of the coffee berry borer, *Hypothenemus hampei*. **Plantations, Recherche**, p. 108-116, 2002.

DUFOUR, B. P.; FRÉROT, B. Optimization of coffee berry borer, *Hypothenemus hampei* Ferrari (Coleoptera: Scolytidae), mass trapping with an attractant mixture. **Journal of Applied Entomology**, v. 132, n. 7, p. 591-600, 2008.

DUFOUR, B. P.; KERANA, I. W.; RIBEYRE, F. Effect of coffee tree pruning on berry production and coffee berry borer infestation in the Toba Highlands (North Sumatra). **Crop Protection**, v. 122, p. 151-158, 2019.

DUFOUR, B. P.; KERANA, I. W.; RIBEYRE, F. Population dynamics of *Hypothenemus hampei* (Ferrari) according to the phenology of *Coffea arabica* L. in equatorial conditions of North Sumatra. **Crop Protection**, v. 146, p. 105639, 2021.

DUFOUR, B. P.; KERANA, I. W.; RIBEYRE, F. Effect of coffee tree pruning on berry production and coffee berry borer infestation in the Toba Highlands (North Sumatra). **Crop Protection**, v. 122, p. 151-158, 2019.

ELKINTON, J. S.; CARDÉ, R. T.; MASON, C. J. Evaluation of time-average dispersion models for estimating pheromone concentration in a deciduous forest. **Journal of Chemical Ecology**, v.10, p.1081-1108, 1984.

ELZHOV, T. V. et al. minpack.lm: R Interface to the Levenberg-Marquardt Nonlinear Least-Squares Algorithm Found in MINPACK, **Plus Support for Bounds**. R package version 1.2-1. 2016.

FERGUSON, C. M.; BARRATT, B. I.; BELL, N.; GOLDSON, S. L.; HARDWICK, S.; JACKSON, M.; WILSON, M. Quantifying the economic cost of invertebrate pests to New Zealand's pastoral industry. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, v. 62, n. 3, p. 255-315, 2019.

FERNANDES, F. L.; PICANÇO, M. C.; CAMPOS, S. O.; BASTOS, C. S.; CHEDIAK, M.; GUEDES, R. N. C.; DA SILVA, R. S. Economic injury level for the coffee berry borer (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) using attractive traps in Brazilian coffee fields. **Journal of Economic Entomology**, v. 104, n. 6, p. 1909-1917, 2011.

FERNANDES, F. L.; PICANÇO, M. C.; SILVA, R. S. D.; SILVA, Í. W. D.; FERNANDES, M. E. D. S.; RIBEIRO, L. H. Mass control of coffee Berry borer using red PET-bottle traps in coffee crop. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 49, n. 8, p. 587-594, 2014.

FERNANDES, F. L.; PICANÇO, M. C.; FERNANDES, M. E. S.; DÂNGELO, R. A. C.; SOUZA, F. F.; GUEDES, R. N. C. A new and highly effective sampling plan using attract ant-baited traps for the coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*). **Journal of Pest Science**, v. 88, n. 2, p. 289-299, 2015.

FERNANDEZ, S.; CORDERO, J. Biología de la broca del café *Hypothenemus hampei* (Ferrari) (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) en condiciones de laboratorio. **Bioagro**, v. 19, n. 1, p. 35-40, jan. 2007.

FERREIRA, A. J.; BUENO, V. H.; MORAES, J. C.; CARVALHO, G. A.; BUENO FILHO, J. S. D. S. Dinâmica populacional da broca-do-café *Hypothenemus hampei* (Ferr.) (Coleoptera: Scolytidae) em Lavras, MG. **Anais da Sociedade Entomológica do Brasil**, v. 29, p. 237-244, 2000.

FREDERICO, S. Globalização, competitividade e regionalização: a cafeicultura científica globalizada no território brasileiro. **GEOUSP Espaço e Tempo (Online)**, v. 18, n. 1, p. 55-70, 2014.

GALLO, D.; NAKANO, O.; SILVEIRA NETO, S.; CARVALHO, R.P.L.; BATISTA, G.C. DE; BERTI FILHO, E.; PARRA, J.R.P.; ZUCCHI, R.A.; ALVES, S.B.; VENDRAMIM, J.D.; MARCHINI, L.C.; LOPES, J.R.S.; OMOTO, C. **Entomologia Agrícola**. Piracicaba: Fealq, 920p. 2002.

GARCIA, A. G.; FERREIRA, C. P.; GODOY, W. A.; MEAGHER, R. L. A computational model to predict the population dynamics of *Spodoptera frugiperda*. **Journal of Pest Science**, v. 92, n. 2, p. 429-441, 2019.

GARCIA, A. G.; MALAQUIAS, J. B.; FERREIRA, C. P.; TOMÉ, M. P.; WEBER, I. D.; GODOY, W. A. C. Ecological Modelling of Insect Movement in Cropping Systems. **Neotropical Entomology**, v. 50, n. 3, p. 321-334, 2021.

GAUTHIER, N. Múltiplas unidades genéticas crípticas em *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Scolytinae): evidências de dados de sequências de DNA microssatélite e mitocondrial. **Biological Journal of the Linnean Society**, v. 101, n. 1, pág. 113-129, 2010.

GILLETT, C.; HONSBERGER, D.; BOGNER, K.K.; SPRAGUE, R.S.; MATSUNAGA, J.N.; RUBINOFF, D. First record of the coffee berry borer *Hypothenemus hampei* (Ferrari, 1867) on the Hawaiian island of Lanai (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae). **Proc. Hawaii. Entomol. Soc.**, v. 52, p. 59-66, 2020.

GIL, Z. N.; BENAVIDES, P.; SOUZA, O. D.; ACEVEDO, F. E.; LIMA, E. Molecular markers as a method to evaluate the movement of *Hypothenemus hampei* (Ferrari). **Journal of Insect Science**, v. 15, n. 1, p. 72, 2015.

GINGERICH, D. P.; BORSA, P.; SUCKLING, D. M.; BRUN, L. O. Inbreeding in the coffee berry borer, *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Scolytidae) estimated from endosulfan resistance phenotype frequencies. **Bulletin of Entomological Research**, v. 86, p. 667-674, 1996.

GIRALDO-JARAMILLO, M.; GARCIA, A. G.; PARRA, J. R. Biology, thermal requirements, and estimation of the number of generations of *Hypothenemus hampei* (Ferrari, 1867) (Coleoptera: Curculionidae) in the State of São Paulo, Brazil. **Journal of Economic Entomology**, v. 111, n. 5, p. 2192-2200, 2018.

GÓMEZ, J.; CHÁVEZ, B. Y.; CASTILLO, A.; VALLE, F. J.; VEGA, F. E. The coffee berry borer (Coleoptera: Curculionidae): how many instars are there? **Annals of the Entomological Society of America**, v. 108, n. 3, p. 311-315, 2015.

GOTELLI, N.J. **Ecologia**, Editora Planta, Londrina, PR, 259 pp. 2007.

GRECO, E. B.; WRIGHT, M. G.; BURGUEÑO, J.; JARONSKI, S. T. Efficacy of *Beauveria bassiana* applications on coffee berry borer across an elevation gradient in Hawaii. **Biocontrol Science and Technology**, v. 28, n. 11, p. 995-1013, 2018.

GUIDE, B. A.; ALVES, V. S.; FERNANDES, T. A. P.; MARCOMINI, M. C., MENEGUIM, A. M.; NEVES, P. M. O. J. Selection of entomopathogenic nematodes and evaluation of their compatibility with cyantraniliprole for the control of *Hypothenemus hampei*. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 39, n. 4, p. 1489-1501, 2018.

GUT, L. J. O.; STELINSKI, L. L.; THOMSON, D. R.; MILLER, J. R.; KOUL, O.; DHALIWAL, G. S. Behaviour-modifying chemicals: prospects and constraints in IPM. p. 73-121. In: Koul O, Dhaliwal G, Cuperus G. eds. **Integrated Pest Management: potential, constraints and challenges**. CABI Publishing, Cambridge, MA, USA. 2004.

HARTVIGSEN, G. Coupling Ecology with Population Biology. **Ecology**, v. 78, p. 643-643, 1997.

HOWSE, P.; STEVENS, I.; JONES, O. Insect pheromones and their use in pest management. Chapman & Hall, United Kingdom, 1998. 369 p.

INFANTE, F. Pest Management Strategies Against the Coffee Berry Borer (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 66, n. 21, p. 5275-5280, 2018.

INFANTE, F.; PÉREZ, J.; VEGA, F. E. Redirect research to control coffee pest. **Nature**, v. 489, n. 7417, p. 502-502, 2012.

INGRAM, W. R. Observations on the control of the coffee berry borer, *Hypothenemus hampei* (Ferr.), with endosulfan in Uganda. **Bulletin of Entomological Research**, v. 57, n. 4, p. 539-547, 1968.

JARAMILLO, J.; CHABI-OLAYE, A.; KAMONJO, C.; JARAMILLO, A.; VEGA, F.E.; POEHLONG, H.M.; BORGEMEISTER, C. Thermal tolerance of the coffee berry borer *Hypothenemus hampei*: predications of climate change impact on a tropical insect pest. **PLoS One**, v.4, n.8, p.1-11, 2009.

JARAMILLO, J.; CHABI-OLAYE, A.; BORGEMEISTER, C. Temperature-dependent development and emergence pattern of *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) from coffee berries. **Journal of Economic Entomology**, v. 103, n. 4, p. 1159-1165, 2010.

JARAMILLO, J.; TORTO, B.; MWENDA, D.; TROEGER, A.; BORGEMEISTER, C.; POEHLING, H. M.; FRANCKE, W. Coffee berry borer joins bark beetles in coffee klatch. **PLoS One**, v. 8, n. 9, p. e74277, 2013.

JOHNSON, M. A.; HOLLINGSWORTH, R.; FORTNA, S.; ARISTIZÁBAL, L. F.; MANOUKIS, N. C. The Hawaii protocol for scientific monitoring of coffee berry borer: a model for coffee agroecosystems world wide. **Journal of Visualized Experiments: JoVE**, n. 133, 2018.

JOHNSON, M. A.; RUIZ-DIAZ, C. P.; MANOUKIS, N. C.; VERLE RODRIGUES, J. C. Coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*), a global pest of coffee: Perspectives from historical and recent invasions, and future priorities. **Insects**, v. 11, n. 12, p. 882, 2020.

KADIGI, R.M.; ROBINSON, E.; SZABO, S.; KANGILE, R.; MGENI, C.P.; DE MARIA, M.; NHAU, B. **Convergence of GDP Per Capita Among Coffee Producing and Re-Exporting Countries in the World**. Available at SSRN 4005217.

KIM, S. G.; KIM, D. I.; KO, S. J.; KANG, B. R.; KIM, H. J.; CHOI, K. J. Determination of economic injury levels and control thresholds for *Spodoptera exigua* on Chinese cabbage. **Korean Journal of Applied Entomology**, v. 48, n. 1, p. 81-86, 2009.

KINDLMANN, P.; JAROSÍK, V.; DIXON, A.F.G. Population dynamics. In: EMDEN, H.F. van; HARRINGTON, R. (Ed.). **Aphids as crop pests**. Wallingford: **CAB International**, 2007.

KING, P. D.; MERCER, C. F.; MEEKINGS, J. S. Ecology of black beetle, *Heteronychus arator* (Coleoptera: Scarabaeidae) - population modelling. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, v. 24, n. 1, p. 99-105, 1981.

KIRKPATRICK, D. M.; GUT, L. J.; MILLER, J. R. Estimating monitoring trap plume reach and trapping area for *Drosophila suzukii* (Diptera: Drosophilidae) in Michigan tart cherry. **Journal of Economic Entomology**, v. 111, n. 3, p. 1285-1289, 2018.

KIRKPATRICK, D. M.; ACEBES-DORIA, A. L.; RICE, K. B., SHORT, B. D.; ADAMS, C. G., GUT, L. J.; LESKEY, T. C. Estimating monitoring trap plume reach and trapping area for nymphal and adult *Halyomorpha halys* (Hemiptera: Pentatomidae) in crop and non-crop habitats. **Environmental Entomology**, v.48, n.5, p.1104–1112, 2019.

KROHLING, C. A.; FORNAZIER, M. J.; MENDONÇA, P. L. P. D.; GUARÇONI, R. C.; MARTINS, D. D. S.; ALIXANDRE, F. T.; RODRIGUES, F. L. M. Best time and doses to associate chemical and biological control of the coffee berry borer in highland region, Brazil. **Coffee Science**, v. 16, n.1, p. 1-11, 2021.

KRISHNAN, S. Sustainable coffee production. In: **Oxford Research Encyclopedia of Environmental Science**. 2017.

LACERDA, I. M.; SZWARCFITER, J. L.; SCHMITZ, E. A.; DE FREITAS, R. Analysis of the Polynomial Complexity of a Classical Algorithm for a Project Scheduling Problem with the Maximization of the Net Present Value. In: **30th European Conference on Operational Research (EURO)**, 2019.

LEEFMANS, S. De Koffiebessenboeboek (*Stephanodors hampei* Ferrari = *coffea Hagedorn*). I. Levenswijze en oecologie. Mededeelingen van het Instituut voor Plantenziekten 57, 1–93. **Rev. Appl. Entomol.**, v. 11, n. 236–237, 1923.

LEITE, M. O. G. **Voláteis de flores de café com etanol e metanol são sinérgicos para a atração de *Hypothenemus hampei* (Ferrari) em cafezais**. 2016. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

LEMMA, D. T.; MEGERSA, H. G. Impact of climate change on East African coffee production and its mitigation strategies. **World Journal of Agricultural Sciences**, v. 17, n. 2, p. 81-89, 2021.

LI, C.; CAO, J.; WANG, X.; XU, P.; WANG, X.; REN, G. Efficacy of an improved method to screen semiochemicals of insect. **PeerJ**, v. 9, p. e11510, 2021.

LINDGREN, B. S. A multiple funnel trap for scolytid beetles (Coleoptera). **The Canadian Entomologist**, v. 115, n. 3, p. 299-302, 1983.

LINDGREN, B. S.; BORDEN, J. H.; CHONG, L.; FRISKIE, L. M.; ORR, D. B. Factors influencing the efficiency of pheromone-baited traps for three species of ambrosia beetles (Coleoptera: Scolytidae). **The Canadian Entomologist**, v. 115, n. 3, p. 303-313, 1983.

MALAQUIAS, J. B.; GODOY, W. A.; GARCIA, A. G.; RAMALHO, F. D. S.; OMOTO, C. Larval dispersal of *Spodoptera frugiperda* strains on *Bt* cotton: a model for understanding resistance evolution and consequences for its management. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 1-10, 2017.

MANSON, S.; NEKARIS, K. A. I.; HEDGER, K.; BALESTRI, M.; AHMAD, N.; ADINDA, E.; CAMPERA, M. Flower visitation time and number of visitor species are reduced by the use of agrochemicals in coffee home gardens. **Agronomy**, v. 12, n. 2, p. 509, 2022.

MARCANO, M.; BOSE, A.; BAYMAN, P. A one-dimensional map to study multi-seasonal coffee infestation by the coffee berry borer. **Mathematical Biosciences**, v. 333, p. 108-530, 2021.

MATHIEU, F.; BRUN, L. O.; FRÉROT, B. Factors related on ative host abandonment by the coffee berry borer *Hypothenemus hampei* (Ferr.)(Col., Scolytidae). **Journal of Applied Entomology**, v. 121, n. 1-5, p. 175-180, 1997.

MATHIEU, F.; BRUN, L. O.; FREROT, B.; SUCKLING, D. M.; FRAMPTON, C. Progression in field infestation is linked with trapping of coffee berry borer, *Hypothenemus hampei* (Col., Scolytidae). **Journal of Applied Entomology**, v. 123, n. 9, p. 535-540, 1999.

MATHIEU, F.; BRUN, L. O.; MARCHILLAUD, C.; FRÉROT, B. Trapping of the coffee berry borer *Hypothenemus hampei* Ferr. (Col., Scolytidae) within a mesh-enclosed environment: interaction of olfactory and visual stimuli. **Journal of Applied Entomology**, Berlin, v. 121, p. 181–186, 1997.

MATHIEU, F.; MALOSSE, C.; FRÉROT, B. Identification of the volatile components released by fresh coffee berries at different stages of ripeness. **Journal of Agriculture and Food Chemistry**, Easton, v. 46, p. 1106–1110, 1998.

MATHIEU, F.; GAUDICHON, V.; BRUN, L. O.; FRÉROT, B. Effect of physiological status on olfactory and visual responses of female *Hypothenemus hampei* during host plant colonization. **Physiological Entomology**, v.26, n.3, p.189–193, 2001.

MATHIEU, F.; GAUDICHON, V.; BRUN, L.O.; FRÉROT, B. Effect of physiological status on olfactory and visual responses of female *Hypothenemus hampei* during host plant colonization. **Physiological Entomology**, Oxford, v. 26, p.189– 193, 2001.

MENDOZA-MORA, J. R. Resposta da broca-do-café. *Hypothenemus hampei*, a estímulos visuais e semioquímicos. **INIAP Archivo Historico**, 1991.

MENDESIL, E.; BRUCE, T. J.; WOODCOCK, C. M.; CAULFIELD, J. C.; SEYOUM, E.; PICKETT, J. A. Semiochemicals used in host location by the coffee berry borer, *Hypothenemus hampei*. **Journal of Chemical Ecology**, v. 35, n. 8, p. 944-950, 2009.

MESSING, R. H. The coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*) invades Hawaii: Preliminary investigations on trap response and alternate hosts. **Insects**, v. 3, n. 3, p. 640-652, 2012.

MEURISSE, N.; PAWSON, S. 2017. Quantifying dispersal of a non-aggressive saprophytic bark beetle. **PLoS One** 12: e0174111. 2017.

MILLER, D. R.; DODDS, K. J.; HOEBEKE, E. R.; POLAND, T. M.; WILLHITE, E. A. Variation in effects of conophthorin on catches of ambrosia beetles (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) in ethanolbaited traps in the United States. **Journal of Economic Entomology**, v. 108, n. 1, p. 183-191, 2015.

MILLER, J. R.; ADAMS, C. G.; WESTON, P. A.; SCHENKER, J. H. Trapping of small organisms moving randomly: principles and applications to pest monitoring and management. **Springer Briefs in Ecology. New York**. 2015.

MONTOYA-RESTREPO, E. C. Caracterización de la infestación del café por la broca y efecto del daño en la calidad de la bebida. **Cenicafé**, v. 50, n. 4, p. 245-258, 1999.

MORAIS, H.; CARAMORI, P. H.; KOGUISHI, M. S.; DE ARRUDA RIBEIRO, A. M. Escala fenológica detalhada da fase reprodutiva de *Coffea arabica*. **Bragantia**, v. 67, n. 1, p. 257-260, 2008.

MOTA, L. H. C.; SILVA, W. D.; SERMARINI, R. A.; DEMÉTRIO, C. G. B.; BENTO, J. M. S.; DELALIBERA JR, I. Autoinoculation trap for management of *Hypothenemus hampei* (Ferrari) with *Beauveria bassiana* (Bals.) in coffee crops. **Biological Control**, v. 111, p. 32-39, 2017.

MOTTA, I. O.; DANTAS, J.; VIDAL, L.; BÍLIO, J.; PUJOL-LUZ, J. R.; ALBUQUERQUE, É. V. The coffee leaf miner, *Leucoptera coffeella* (Lepidoptera: Lyonetiidae): identification of the larval instars and description of male and female genitalia. **Revista Brasileira de Entomologia**, v. 65, 2021.

MURTAZA, G.; RAMZAN, M.; GHANI, M. U.; MUNAWAR, N.; MAJEED, M.; PERVEEN, A.; UMAR, K. Effectiveness of different traps for monitoring sucking and chewing

insect pests of crops. **Egyptian Academic Journal of Biological Sciences. A, Entomology**, v. 12, n. 6, p. 15-21, 2019.

NJIHIA, T. N.; JARAMILLO, J.; MURUNGI, L.; MWENDA, D.; ORINDI, B. Spiroacetals in the Colonization Behaviour of the Coffee Berry Borer: A 'Push-Pull' System. **PLoS One** 9(11): e1111316, 2014.

NGUYEN, T.N.M.; CHOO, A.; BAXTER, S.W. Lessons from *Drosophila*: Engineering Genetic Sexing Strains with Temperature-Sensitive Lethality for Sterile Insect Technique Applications. **Insects** 12(3): 243. 2021.

OLIVEIRA, C. M.; AUAD, A. M.; MENDES, S. M.; FRIZZAS, M. R. Economic impact of exotic insect pests in Brazilian agriculture. **Journal of Applied Entomology**, v. 137, n. 1-2, p. 1-15, 2013.

ORTIZ, A.; VEGA, F. E.; POSADA, F. Volatile composition of coffee berries at different stages of ripeness and their possible attraction to the coffee berry borer *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Curculionidae). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 52 (19), 2004.

PARDEY, A.E.B.; GUOTT, D.A.V. Efecto del clima y condiciones de cultivo del café en la biología y comportamiento de la broca-do-café, *Hypothenemus hampei* (Ferrari) (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae). In: WORKSHOP INTERNACIONAL SOBRE MANEJO DA BROCA-DO-CAFÉ, 2007, Londrina. Proceedings... Londrina: IAPAR, p. 95-112, 2007.

PLATA-RUEDA, A.; MARTÍNEZ, L. C.; DA SILVA, B. K. R.; ZANUNCIO, J. C.; FERNANDES, M. E. D. S.; GUEDES, R. N. C.; FERNANDES, F. L. Exposure to cyantraniliprole causes mortality and disturbs behavioral and respiratory responses in the coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*). **Pest Management Science**, v. 75, n. 8, p. 2236-2241, 2019.

PEDIGO, L. P.; HUTCHINS, S. H.; HIGLEY, L. G. Economic injury levels in theory and practice. **Annual Review of Entomology**, v. 31, n. 1, p. 341-368, 1986.

PEDIGO, L. P.; RICE, M. E. Entomology and pest management, 5th ed. **Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ**. 2006

PEREIRA, A. E.; VILELA, E. F.; TINOCO, R. S.; DE LIMA, J. O. G.; FANTINE, A. K.; MORAIS, E. G.; FRANÇA, C. F. Correlation between numbers captured and infestation levels of the coffee berry-borer, *Hypothenemus hampei*: a preliminary basis for an action threshold using baited traps. **International Journal of Pest Management**, v. 58, n. 2, p. 183-190, 2012.

PEREVARYUKHA, A. Y. Continuous model for the devastating oscillation dynamics of local forest pest populations in Canada. **Cybernetics and Systems Analysis**, v. 55, n. 1, p. 141-152, 2019.

PEZZOPANE, J.R.M.; PEDRO JÚNIOR, M.J.; THOMAZIELLO, R.A.; CAMARGO, M.B.P.D. Escala para avaliação de estádios fenológicos do cafeeiro arábica. **Bragantia**. n. 62 p. 499-505, 2003.

POLAND, T. M.; HAACK, R. A.; PETRICE, T. R.; SADOFF, C. S.; ONSTAD, D. W. Dispersal of *Tomicus piniperda* (Coleoptera: Scolytidae) from operational and simulated mill yards. **The Canadian Entomologist** 132: 853-866. 2000.

PORTILLA, M.; GRODOWITZ, M. Abridged Life Tables for *Cephalonomia stephanoderis* and *Prorops nasuta* (Hymenoptera: Bethyilidae) Parasitoids of *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) Reared on Artificial Diet. **Journal of Insect Science**, v. 18, n. 2, p. 20, 2018.

RAFAEL J.A.; MELO G.A.R.; CARVALHO C.J.B.; CASARI S.A.; CONSTANTINO R. Insetos do Brasil: Diversidade e Taxonomia. Ribeirão Preto. Holos Editora, 2012. 81p.

RANGER, C. M.; BIEDERMANN, P. H.; PHUNTUMART, V.; BELIGALA, G. U.; GHOSH, S.; PALMQUIST, D. E.; MUELLER, R.; BARNETT, J.; SCHULTZ, P. B.; REDING, M.E.; BENZ, J. P. Symbiont selection via alcohol benefits fungus farming by ambrosia beetles. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 115, n. 17, p. 4447-4452, 2018.

RANGER, C. M.; SCHULTZ, P. B.; FRANK, S. D.; REDING, M. E. Freeze stress of deciduous trees induces attacks by opportunistic ambrosia beetles. **Agricultural and Forest Entomology**, v. 21, n. 2, p. 168-179, 2019.

R CORE TEAM (2016). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. < <https://www.r-project.org/> >.

ROBLERO, E. N.; MALO, E. A. Chemical Analysis of Coffee Berry Volátiles That Elicit an Antennal Response From the Coffee Berry Borer *Hypothenemus hampei*. **Journal of the Mexican Chemical Society**, Ciudad de México, v. 57, n. 4, p. 321-327, 2013.

RODRÍGUEZ-BENITO, Y.; GONZÁLEZ-VEGA, M. E.; VÁZQUEZ-LÓPEZ, E.; GUTIÉRREZ, C. G.; MAGALLANESTAPIA, M. A.; DUARTE, B. N. D.; CHAVÉZ E. S.; PÉREZ-ÁLVAREZ, S. Fruit recollection after harvest reduces the infestation of the coffee drill *Hypothenemus hampei* (Ferrari) 1 in Santiago de Cuba. **Southwestern Entomologist**, p. 447-456, 2018.

RODRÍGUEZ, D.; CURE, J. R.; GUTIERREZ, A. P.; COTES, J. M. A. coffee agroecosystem model: III. Parasitoids of the coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*). **Ecological Modelling**, v. 363, p. 96-110, 2017.

ROJAS, J.C. Electrophysiological and Behavioral Responses of the Cabbage Moth to Plant Volatiles. **Journal of Chemical Ecology**, v. 25, 1867–1883, 1999.

RUIZ-CÁRDENAS, R.; BAKER, P. Life table of *Hypothenemus hampei* (Ferrari) in relation to coffee berry phenology under Colombian field conditions. **Scientia Agricola**, v. 67, n. 6, p. 658-668, 2010.

RUIZ-DIAZ, C. P.; RODRIGUES, J. C. V. Vertical trapping of the coffee berry borer, *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Scolytinae), in coffee. **Insects**, v. 12, n. 7, p. 607, 2021.

RYDHMER, K.; BICK, E.; STILL, L.; STRAND, A.; LUCIANO, R.; HELMREICH, S.; NIKOLAJSSEN, T. Automating insect monitoring using unsupervised near-infrared sensors. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, p. 1-11, 2022.

SABERIAN, M.; LI, J.; DONNOLI, A.; BONDERENKO, E.; OLIVA, P.; GILL, B.; SIDDIQUE, R. Recycling of spent coffee grounds in construction materials: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 289, p. 125837, 2021.

SANTOS, M. R. A.; LIMA, R. A.; SILVA, A. G.; TEIXEIRA, C. A. D.; ALPIREZ, I. P. V.; FACUNDO, V. A. Chemical constituents and insecticidal activity of the crude acetonic extract of *Piper alatabaccum* Trel & Yuncker (Piperaceae) on *Hypothenemus hampei* Ferrari. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, v. 15, n. 3, p. 332-336, 2013.

SARAVANAN, P. A.; CHOZHAN, K. Monitoring and management of coffee berry borer, *Hypothenemus hampei* Ferrari (Scolytidae: Coleoptera). **Crop Research**, v. 26, p. 154–158, 2003.

SAS. **SAS Institute Inc**® 2011. Cary, NC, USA, Lic. UDESC: SAS Institute Inc, 2011.

SCHLYTER, F. Sampling range, attraction range, and effective attraction radius: estimates of trap efficiency and communication distance in coleopteran pheromone and host attractant systems. **Journal of Applied Entomology**, n. 114, p. 439–454, 1992.

SERRATO-DIAZ, L. M.; MARIÑO, Y. A.; BAYMAN, P. Pathogens causing anthracnose and fruit rots of coffee associated with the coffee berry borer and the entomopathogenic fungus *Beauveria bassiana* in Puerto Rico. **Phytopathology**, v. 110, n. 9, p. 1541-1552, 2020.

SHIPP, J. L.; WANG, K.; BINNS, M. R. Economic injury levels for western flower thrips (Thysanoptera: Thripidae) on greenhouse cucumber. **Journal of Economic Entomology**, v. 93, n. 6, p. 1732-1740, 2000.

SHOEMAKER, C. Applications of dynamic programming and other optimization methods in pest management. **IEEE Transactions on Automatic Control**, v. 26, n. 5, p. 1125-1132, 1981.

SILVA, A. F. C. D. A campanha contra a broca-do-café em São Paulo (1924-1927). **História, Ciências, Saúde-Manguinhos**, v. 13, n. 4, p. 957-993, 2006.

SILVA, W. D. Comportamento sexual da broca-do-café, *Hypothenemus hampei* (Ferrari, 1867) (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae). Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

SILVA, W. D. Idade de fêmeas colonizadoras de *Hypothenemus hampei* (Ferrari) e sua resposta aos voláteis de flores de café, *Coffea arabica* L. 2014. 15 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

SILVA, S. A.; PEREIRA, R. G. F. A.; DE AZEVEDO LIRA, N.; DA GLORIA, E. M.; CHALFOUN, S. M.; BATISTA, L. R. Fungi associated to beans infested with coffee berry borer and the risk of ochratoxin A. **Food Control**, v. 113, p. 107-204, 2020.

SILVA, W. D.; COSTA, C. M.; BENTO, J. M. S. How old are colonizing *Hypothenemus hampei* (Ferrari) females when they leave the native coffee fruit?. **Journal of Insect Behavior**, v. 27, n. 6, p. 729- 735, 2014.

SILVEIRA, E. S.; SILVA, R. M.; ROEL, A. R.; CEREDA, M. P. Influência de fatores ambientais, cor e altura de armadilhas na captura do caruncho do bambu. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 4, n. 4, p. 8-14, 2017.

SOKAL, R. R.; ROHLF, F. J. **Biometry: the principles of statistics in biological research**. 1995.

SOULSBY, R.; THOMAS, J. Insect population curves: Modelling and application to butterfly transect data. **Methods in Ecology and Evolution**. 2012.

SOUZA, J. C.; REIS, P. R.; SILVA, R. A.; DE CARVALHO, T. A. F.; PEREIRA, A. B. Chemical control of the coffee Berry borer with cyantraniliprole. **Coffee Science**, v. 8, n. 4, p. 404-410, 2013.

SOUZA, M. S.; COSTA, J. N. M.; ESPINDULA, M. C.; ALMEIDA, A. Performance of baited traps for integrated management of *Hypothenemus hampei* Ferrari (Coleoptera: Scolytinae) in a conilon coffee crop in Rondônia State, Brazil. **EntomoBrasilis**, v. 13, p. 8, 2020a.

SOUZA, A. P.; BUENO, J. M. Pesquisas sobre a cadeia produtiva do café: uma análise bibliométrica da literatura na área de administração. **Desafio Online**, v. 10, n. 1, 2022.

SOUZA, R. A.; PRATISSOLI, D.; ARAÚJO JÚNIOR, L. M.; PINHEIRO, J. A.; SOUZA, J. F. V.; MADALON, F. Z.; DEOLINDO, F. D.; DAMASCENA, A. P. *Hypothenemus hampei* Ferrari (Coleoptera: Curculionidae) answer to visual and olfactive stimuli in field. **Coffee Science**, v. 15, e151656, 2020b.

SOUZA, R. A.; PRATISSOLI, D.; DE ARAUJO JUNIOR, L. M.; DE ASSIS PINHEIRO, J.; ATAÍDE, J. O.; GONÇALVES, L. A.; DAMASCENA, A. P. Mortality of Coffee Berry Borer, *Hypothenemus hampei* in Field, with Pre and Post Application of Entomopathogenic Fungus *Beauveria bassiana* (Balsamo) Associated to Emulsifiers. **Int J Adv Eng Res Sci**, v. 7, n. 5, 2020c.

STERN, V. M.; SMITH, R. F.; VAN DEN BOSCH, R.; HAGEN, K. S. The integrated control concept. **Hilgardia**, v. 29, p. 81–101, 1959.

SUN, S.; WANG, Z.; LIU, A.; LAI, S.; WANG, J.; MENG, Q.; LI, Y. First Record of the Coffee Berry Borer, *Hypothenemus hampei* (Ferrari)(Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) on Hainan Island, China. **The Coleopterists Bulletin**, v. 74, n. 4, p. 710-713, 2020.

SUPRIYATDI, D.; ERFANDARI, O. "Attack Intensity Variety of Robusta Coffee Bean Borer (*Hypothenemus Hampei* Ferrari) on Four Types of Shade Plant." **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 1012, n. 1, 2022.

SUSWATI, S.; HUTAPEA, S.; BARUS, R. I.; SETIAWAN, S.; HUTAPEA, A. P. Integrated Control of Coffee Bean Borer (*Hypothenemus Hampei*) on Sigararutang Coffee, Motung Village, Ajibata Sub-district, Toba Samosir District, Sumatera Utara. **Budapest International Research in Exact Sciences (BirEx) Journal**, v. 2, n. 1, p. 52-61, 2020.

TEIXEIRA, C. A.; SOUZA, O. D.; COSTA, J. N. "Conilon" coffee berries bored by *Hypothenemus hampei* (Ferrari) (Coleoptera: Scolytidae): what matters if they drop down during the fruiting phase? **Neotropical Entomology**, v. 35, p. 390-394, 2006.

TICHELER, J.H.G. Estudio analítico de la epidemiología del escolítido de los granos de café *Stephanoderes hampei* Ferr. en Costa de Marfil. **Cenicafé**, Chinchina, v. 14, p. 223-294, 1963.

TINGLE, F. C.; MITCHELL, E. R. Relationships between pheromone trap catches of male tobacco budworm, larval infestations, and damage levels in tobacco. **Journal of Economic Entomology**, v. 74, n. 4, p. 437-440, 1981.

TOLEDO, A. A.; de; DUVAL, G.; SAUER, H. A broca-do-café. **O Biológico**, São Paulo, v. 13, n. 7, p. 113-118, 1947.

TURCHIN, P.; ODENDAAL, F. J. Measuring the effective sampling area of a pheromone trap for monitoring population density of southern pine beetle (Coleoptera: Scolytidae). **Environmental Entomology**, n. 25, p. 582-588, 1996.

UEMURA-LIMA, D. H.; VENTURA, M. U.; MIKAMI, A. Y.; DA SILVA, F. C.; MORALES, L. Responses of coffee berry borer, *Hypothenemus hampei* (Ferrari) (Coleoptera: Scolytidae), to vertical distribution of methanol: ethanol traps. **Neotropical Entomology**, v. 39, n. 6, p. 930-933, 2010.

VAYSSIÈRES, J. F.; KORIE, S.; COULIBALY, O.; VAN MELLE, C.; TEMPLE, L.; ARINLOYE, D. The mango tree in central and northern Benin: damage caused by fruit flies (Diptera Tephritidae) and computation of economic injury level. **Fruits**, v. 64, n. 4, p. 207-220, 2009.

VEGA, F. E. Coffee berry borer, *Hypothenemus hampei* (Ferrari) (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae). In: **Encyclopedia of Entomology**. Springer, Dordrecht, p. 959-960, 2008.

VEGA, F. E.; BROWN, S. M.; CHEN, H.; SHEN, E.; NAIR, M. B.; CEJA-NAVARRO, J. A.; PAIN, A. Draft genome of the most devastating insect pest of coffee world wide: the coffee berry borer, *Hypothenemus hampei*. **Scientific reports**, v. 5, p. 12525, 2015a.

VEGA F. E.; INFANTE, F.; JOHNSON, A. J. The genus *Hypothenemus*, with emphasis on *H. hampei*, the coffee berry borer. In: Vega, F. E., Hofstetter R. W. (eds) Bark beetles: biology and ecology of native and invasive species. **Academic Press**, p. 427–494, 2015c.

VEGA, F.E.; SIMPKINS, A.; BAUCHAN, G.; INFANTE, F.; KRAMER, M.; LAND, M.F. On the eyes of male coffee berry borers as rudimentary organs. **PLoS One**, v.9, n.1, 2014

VEGA, F.E.; EMCHE, S.; SHAO, J.; SIMPKINS, A.; SUMMERS, R.M.; MOCK, M.B.; MAUL, J.E. Cultivation and genome sequencing of bacteria isolated from the coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*), with emphasis on the role of caffeine degradation. **Frontiers in Microbiology**, v. 12, p. 692, 2021.

VEGA, F. E.; INFANTE, F.; JOHNSON, A. J. The genus *Hypothenemus*, with emphasis on *H. hampei*, the coffee berry borer. In **Bark Beetles: Biology and Ecology of Native and Invasive Species**; Vega, F. E.; Hoffstetter, R. W., Eds.; Academic Press: San Diego, CA, USA, pp 427– 494, 2015b.

VEGA, F.E. Coffee berry borer *Hypothenemus hampei* (Ferrari) (Coleoptera: Scolytidae). In: CAPINERA, J. L. (Ed.), **Encyclopedia of Entomology**, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, cap. c, p. 575–576, 2004.

VELASCO-PASCUAL, H.; BERISTAIN, R. B.; DÍAZ, C. S.; LLAVÉN, G. J. M.; VELÁZQUEZ, V. A. F. Respuesta de la broca del fruto *Hypothenemus hampei* Ferr. a extractos de cerezas de café utilizados como atrayentes en Tepatlaxco, Veracruz, México. **Informe de proyecto. Sistema de Investigación del Golfo de México**, México. 1997.

VILLACORTA, A.; POSSAGNOLO, A. F.; SILVA, R. Z.; RODRIGUES, P. S. Um modelo de armadilha com semioquímicos para o manejo integrado da broca do café *Hypothenemus hampei* (Ferrari) no Paraná. In: **Simposio de pesquisa dos cafés do Brasil. Vitória. Brasil**, 2001.

VILLEGAS, J. M.; WILSON, B. E.; WAY, M. O. Management of stemborers (Lepidoptera: Crambidae) using foliar-applied chlorantraniliprole in rice. **Florida Entomologist**, v. 104, n. 4, p. 274-281, 2021.

WALKER, H. E.; LEHMAN, K. A.; WALL, M. M.; SIDERHURST, M. S. Analysis of volatile profiles of green Hawai'ian coffee beans damaged by the coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*). **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 99, n. 4, p. 1954-1960, 2019.

WARTHEN, J. D.; LEE, C. J.; JANG, E. B.; LANCE, D. R.; MCLNNIS, D. O. Volatile, potential attractants from ripe coffee fruit for female mediterranean fruit fly. **Journal of Chemical Ecology**, v. 23, n. 7, p. 1981-1990, 1997.

WANG, W.; XU, F.; HUANG, Y. FENG, H.; WAN, P. Modeling the evolution of resistance in cotton bollworm to concurrently planted Bt cotton and Bt maize in China. **Ecological Modelling**, v. 467, p. 109912, 2022.

WRAIGHT, S. P.; GALAINI-WRAIGHT, S.; HOWES, R. L.; CASTRILLO, L. A.; CARRUTHERS, R. I.; SMITH, R. H.; MATSUMOTO, T.K.; KEITH, L. M. Prevalence of naturally-occurring strains of *Beauveria bassiana* in populations of coffee berry borer *Hypothenemus hampei* on Hawai'i Island, with observations on coffee plant - *H. hampei*-*B. bassiana* interactions. **Journal of invertebrate pathology**, v. 156, p. 54-72, 2018.

WOOD, S.L. **Bark and Ambrosia Beetles of South America (Coleoptera: Scolytidae)**. Monte L. Bean Science Museum, Brigham Young University, Provo, Utah. p. 900, 2007.

ZAKIR, A.; BENGTSSON, M.; SADEK, M. M.; HANSSON, B. S.; WITZGALL, P.; ANDERSON, P. Specific response to herbivore-induced de novo synthesized plant volatiles provides reliable information for host plant selection in a moth. **Journal of Experimental Biology**, v. 216, n. 17, p. 3257–3263, 2013.

ZHONG, Y.; GAO, J.; LEI, Q.; ZHOU, Y. A vision-based counting and recognition system for flying insects in intelligent agriculture. **Sensors**, v. 18, n. 5, p. 1489, 2018.

ZORZETTI, J.; NEVES; O.J. P. M.; CONSTANSKI, K. C.; SANTORO, P. H.; BATISTA F. I. C. Plant extracts on *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Curculionidae) and *Beauveria bassiana* **Semina: Ciências Agrárias**, v. 33, n. 1, 2012.

APÊNDICES

Apêndice A. Algoritmo construído em ambiente R (R Core Team, 2020) para o desenvolvimento do modelo relação entre a taxa intrínseca de aumento natural (r) e a temperatura

```

library(dplyr)
library(ggpubr)
library(ggplot2)

reproductive<-function(T,a){
  #funcao gaussiana que relaciona o valor de r com a temperatura
  r<-a*0.1406 * exp(-0.5 * ((T - 26.2959)/4.5907)^2)
  return(r)
}

dynamics <- function(r,K,broca){
  #calcula a dinamica da broca
  if(broca > K){
    broca <- K
  }else{

    broca<-broca + broca*r*(1-broca/K)
    return(broca)

  }
}

convert1 <- function(broca){
  #converte o numero de brocas para total de infestação
  infestation<-1.5082*exp(0.0069*broca)
  return(infestation)

}

convert2 <- function(infestation){
  #converte infestação para dano

```

```
damage<--0.0156764+0.1868517*infestation
return(damage)
}

{r}
#K: capacidade suporte
#a: controle (0-1), sendo que 1 é condição sem controle
file<-read.table("temp_mand.csv", sep="," ,dec=".",head=TRUE)#arquivo de temperatura
ano<-365 #total de dias do ano
ciclos<-3 #quantos anos irá se repetir

#inicialização dos vetores
K<-c()
r<-c()
a<-c()
coleta<-c()
pop<-c()
inf<-c()
dam<-c()

broca<-100 #total de brocas iniciais

source("madalon.R")#chama o arquivo com as funções

for(j in 1:ciclos){
for(i in 1:ano){

if(i<30){
K<-138 #expansion
a<-1 # controle no expansion
}else if(i>31 & i<120){
K<-96 #granulation
a<-1 #controle no granulation
} else if (i>121 & i<240){
K<-362 #maturation
a<-1 # controle no maturation
} else if (i>241 & i<270){
```

```

K<-76 #off
a<-1 #controle off
} else if(i>271 & i<300){
K<-340 #flowers
a<-1 #controle flowers
}else if (i>300){
K<-124 #small green
a<-1 #controle small green
}

reproductive(file$T2M[i],a) #cálculo da taxa de crescimento

broca<-dynamics(r,K,broca)# calculo numero brocas
infestation<-convert1(broca) #calculo da infestação
damage<-convert2(infestation)# calculo do dano
x<-i + ano*(j-1)
pop[x]<-broca #vetor de brocas
inf[x]<-infestation #vetor de infestação
dam[x]<-damage #vetor de dano
}
j=j+1
}
#comparando dados de campo com o modelo
coleta$y<-c(113,83,53,54,87,173,280,341,57,267,49,96)
coleta$x<-c(30,60,90,120,150,180,210,240,270,300,330,360)
plot(coleta$x,coleta$y,pch=19,col="black",ylim=c(0,400),xlim=c(0,365),ylab="brocas",xlab="dias")
lines(pop, type ="l",ylim=c(0,400),xlim=c(0,365), col="blue", ylab="brocas",xlab="dias")
plot(pop, type ="l",ylab="brocas",xlab="dias") #dinamica brocas
lines(pop, type ="l",col="red",ylab="brocas",xlab="dias") #dinamica brocas

plot(inf, type ="l",ylab="infestação (%)",xlab="dias") #dinamica infestacao

plot(dam, type ="l",ylab="dano (%)",xlab="dias") #dinamica infestação

{r}

```

Apêndice B. simulação variando os valores de COP e V gerando uma matriz de valores que posteriormente foi apresentado em um gráfico de superfície de resposta para melhor compreensão da variação do NDE nas variadas circunstâncias simuladas.

	300	397.95	422.44	520.40	618.36	716.32	814.28	912.24	1010.20	1108.16	1206.12	1304.08	1402.04	1500
300	7,64	5,76	5,43	4,41	3,71	3,20	2,82	2,51	2,27	2,07	1,90	1,76	1,64	1,53
406.12	10,35	7,80	7,35	5,97	5,02	4,33	3,81	3,40	3,07	2,80	2,57	2,38	2,21	2,07
512.24	13,05	9,84	9,27	7,53	6,33	5,47	4,81	4,29	3,88	3,53	3,25	3,00	2,79	2,61
618.36	15,75	11,88	11,19	9,08	7,65	6,60	5,81	5,18	4,68	4,27	3,92	3,63	3,37	3,15
724.48	18,46	13,92	13,11	10,64	8,96	7,73	6,80	6,07	5,48	5,00	4,59	4,25	3,95	3,69
804.08	20,49	15,45	14,55	11,81	9,94	8,58	7,55	6,74	6,09	5,55	5,10	4,71	4,38	4,10
910,2	23,19	17,49	16,47	13,37	11,25	9,71	8,55	7,63	6,89	6,28	5,77	5,34	4,96	4,64
989,79	25,22	19,02	17,91	14,54	12,24	10,56	9,29	8,30	7,49	6,83	6,27	5,80	5,40	5,04
1016,32	25,90	19,53	18,39	14,93	12,57	10,85	9,54	8,52	7,69	7,01	6,44	5,96	5,54	5,18
1122,44	28,61	21,56	20,31	16,49	13,88	11,98	10,54	9,41	8,49	7,74	7,12	6,58	6,12	5,72
1202,04	30,63	23,09	21,75	17,66	14,86	12,83	11,29	10,07	9,10	8,29	7,62	7,05	6,55	6,13
1281,63	32,66	24,62	23,19	18,83	15,85	13,68	12,03	10,74	9,70	8,84	8,12	7,51	6,99	6,53
1308,16	33,34	25,13	23,68	19,22	16,17	13,96	12,28	10,96	9,90	9,03	8,29	7,67	7,13	6,67
1387,75	35,37	26,66	25,12	20,39	17,16	14,81	13,03	11,63	10,50	9,57	8,80	8,14	7,57	7,07