

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE
CAMPUS SOROCABA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PLANEJAMENTO E USO DE RECURSOS
RENOVÁVEIS

Sandra Fazenete Picardo Massamba

**Manejo de *Megastigmus transvaalensis* (Hymenoptera: Torymidae) e produtividade de
Schinus terebinthifolia (Sapindales: Anacardiaceae) em área de restauração**

Sorocaba – SP
Abril – 2026

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE
CAMPUS SOROCABA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PLANEJAMENTO E USO DE RECURSOS
RENOVÁVEIS

Sandra Fazenete Picardo Massamba

**Manejo de *Megastigmus transvaalensis* (Hymenoptera: Torymidae) e produtividade de
Schinus terebinthifolia (Sapindales: Anacardiaceae) em área de restauração**

Tese de Doutorado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Planejamento e Uso de Recursos
Renováveis.

Orientação: Prof. Dr. Pedro José Ferreira
Filho

Co-orientador: Thiago Archangelo Freato

Financiamentos: Coordenação de
Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível
Superior, Conselho Nacional de
Desenvolvimento Científico e
Tecnológico e Programa de Formação de
Professores de Educação Superior de
Países Africanos.

Sorocaba – SP

Abril – 2026

Massamba, Sandra Fazenete Picardo

Manejo de *Megastigmus transvaalensis* (Hymenoptera: Torymidae) e produtividade de *Schinus terebinthifolia* (Sapindales: Anacardiaceae) em área de restauração / Sandra Fazenete Picardo Massamba -- 2026.
192f.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba

Orientador (a): Pedro José Ferreira Filho

Banca Examinadora: Cláudio Roberto Thiersch, Maurício

Cetra, Júlio César Guerreiro, Nádia Cristina de Oliveira

Bibliografia

1. Aroeira pimenteira. 2. Monitoramento operacional. 3. Praga florestal. I. Massamba, Sandra Fazenete Picardo.
II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática
(SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Maria Aparecida de Lourdes Mariano -
CRB/8 6979

SANDRA FAZENETE PICARDO MASSAMBA

Manejo de *Megastigmus transvaalensis* (Hymenoptera: Torymidae) e produtividade de *Schinus terebinthifolia* (Sapindales: Anacardiaceae) em área de restauração

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis para obtenção do título de Doutor em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis.
Sorocaba, 22 de abril de 2026.

Orientador

Prof. Dr. Pedro José Ferreira Filho
Universidade Federal de São Carlos-UFSCar

Examinador

Prof. Dr. Cláudio Roberto Thiersch
Universidade Federal de São Carlos-UFSCar

Examinador

Prof. Dr. Maurício Cetra
Universidade Federal de São Carlos – UFSCar

Examinador externo

Prof. Dr. Júlio César Guerreiro
Universidade Estadual de Maringá – UEM

Examinador externo

Profa. Dra. Nádia Cristina de Oliveira
Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

O Relatório de Defesa produzido pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação.

As minhas filhas:
Kassandra, Edelaine e Wayra.

AGRADECIMENTOS

Á Deus por ter me dado o privilégio e forças para fazer o Doutorado, diante das dificuldades enfrentadas;

Ao prof. Dr. Pedro José Ferreira Filho, pela atenção, paciência e orientação no trabalho, que fez que esse sonho se tornasse uma realidade;

Ao prof. Dr. Thiago Archangelo Freato pela coorientação dedicação e atenção prestada;

À memória dos meus amados pais, Manuel Picardo e Helena Paulo Manuel Picardo, meus primeiros exemplos de força. Sua ausência física é preenchida pelo orgulho de honrar seus nomes nesta etapa final do meu doutorado.

Ao meu esposo Edson Massamba, as minhas filhas Kassandra, Edelaine e Wayra; e as minhas irmãs Felícia, Helena, Paula, Uaquelina e meu sobrinho Álvaro, que sempre estiveram prontos a ajudar moralmente;

Expresso minha gratidão à CAPES e ao CNPq pela concessão da bolsa de estudos, fundamental para a dedicação exclusiva a esta pesquisa. Agradeço ao programa de convênio ProAfri pela oportunidade de realizar o doutorado e ao PPGPUR, em especial ao seu corpo docente, pelo conhecimento compartilhado e pela paciência acadêmica. Estendo meu agradecimento à secretária do programa, Luciana, pelo zelo, paciência e atenção constantes. Por fim, agradeço à UFSCar por disponibilizar sua infraestrutura e ambiente institucional para a viabilização deste trabalho.

Agradeço ao Laboratório de Análises de Sementes (LASEM), ao Laboratório de Anatomia da Madeira, ao Laboratório de Ações Antropogênicas e ao laboratório de Física, em nome dos professores Fátima, Ayrton, Janaina, Franciane e professor Marcelo pela gentil autorização para utilização dos espaços e instrumentos necessários à conservação e análise das amostras.

Meus amigos e colegas nomeadamente: Sancho, Lindomar, Maycon, Valquíria, David, Rafael, Jennifer, Bruna, Gabriela, Febriana, Elias, Ana, Manuel, Belton, Tonito, Osvaldo, Machava, Paula, Maria e Joana demais pelo companheirismo durante o meu percurso acadêmico. Á todos que contribuíram direta ou indiretamente, para a realização desta Tese, vai meu *Kanimambo*.

*O ensino do sábio é a melhor fonte para nos salvar dos laços destruidores (Prov 13:14)
...os prudentes se coroam de conhecimento (Prov 14:18b) &
os sábios entesouram o conhecimento (Prov 10:14a)*

RESUMO

Métodos de controle eficientes, sustentáveis e economicamente viáveis são estudados para o monitoramento de pragas florestais, como por exemplo, para vespa exótica *Megastigmus transvaalensis* Hussey, 1956 (Hymenoptera: Torymidae). Essa vespa danifica drupas da aroeira-vermelha *Schinus terebinthifolia* Raddi, 1820 (Sapindales: Anacardiaceae) em floresta nativa, área de restauração e cultivo comercial no Brasil. Devido ao valor econômico de *S. terebinthifolia* e aplicações como condimento alimentar, medicina tradicional, cosméticos, compostos bioativos, indústria farmacêutica, biopesticidas, aromatizantes e na recuperação de áreas degradadas, há necessidade de proteger as drupas dessa planta do ataque de *M. transvaalensis* no campo. O objetivo deste estudo foi: i) utilizar barreira física para impedir o ataque de *M. transvaalensis* e determinar a taxa de parasitismo às drupas de *S. terebinthifolia*, ii) avaliar a cinética de secagem das drupas em laboratório e ii) estimar a produtividade dessa planta no campo. Cinco fragmentos de floresta estacional semidecidual em processo de restauração ecológica com dezesseis plantas de *S. terebinthifolia* aleatoriamente selecionadas foram utilizadas no estudo. Barreira física com manta agrotêxtil TNT (com 25 cm comprimento x 21 cm de largura) foi utilizada como tratamento e aplicado durante aproximadamente 120 dias. No estudo de secagem, drupas maduras foram submetidas a diferentes temperaturas (30°C e 105°C), ajustando-se os dados para teor de umidade e para redução da massa aos modelos exponencial e hiperbólico. Para a estimativa produtiva, foram coletados dados de diâmetro a altura do peito (DAP), altura total da árvore (Ht) e área da copa (Acopa) de 16 indivíduos, aplicando-se Análise de Componentes Principais (PCA) para reduzir a dimensionalidade e para a predição do rendimento. A taxa de parasitismo foi maior (60,45%) no tratamento não protegido e menor (8,06%) no protegido com manta agrotêxtil TNT, preservando a integridade embrionária e do epicarpo das drupas de *S. terebinthifolia*. O modelo hiperbólico demonstrou superioridade estatística apresentando indicadores de performance para a predição tanto do teor de umidade ($R^2\text{Adj} = 0,98$; $\text{AIC} = 196,52$; $\text{RMSE} = 0,55$; $X^2\text{red} = 0,308$), quanto para a redução da massa ($R^2\text{Adj} = 0,954$, $\text{AIC} = 254,50$; $\text{RMSE} = 0,706$; $X^2\text{red} = 0,507$), superando o modelo exponencial, e a cinética de secagem apresentou velocidade máxima inicial de $0,7916\%\text{h}^{-1}$ com uma redução acentuada após 24h ($0,1112\%\text{h}^{-1}$), com o ponto assintótico ($y = 1,9\%$), estabeleceu-se o tempo de 48 horas ($0,0421\%\text{h}^{-1}$) como ideal para a desidratação das drupas de *S. terebinthifolia*. Por fim, a modelagem da produtividade das plantas de *S. terebinthifolia* integrou

variáveis dendroméricas e taxas de parasitismo monitoradas ao longo do período de estudo no campo e revelou que variáveis isoladas como DAP ($p = 0,021$), apresentaram instabilidade nos modelos devido a multicolinearidade, dessa forma Análise de Componentes Principais (PCA) foi realizada, com primeiro componente (PC1, vigor da planta) destacando-se como preditor mais fiel da produtividade ($R^2_{adj} = 0,27$; $p = 0,0204$), enquanto que a taxa de parasitismo médio por *M. transvaalensis* (P_Medio) não apresentou influencia linear direta significativa na amostra estudada ($n = 16$). Desta forma, a integração de métodos de exclusão física de pragas e modelagem matemática estabelece subsídios fundamentais para o manejo pós-colheita e a reprodutibilidade de processos de restauração florestal com a *S. terebinthifolia*.

Palavras-chave: Aroeira pimenteira; monitoramento operacional; praga florestal; proteção florestal; vespa exótica.

ABSTRACT

Efficient, sustainable, and economically viable control methods are studied for monitoring forest pests, such as the exotic wasp *Megastigmus transvaalensis* Hussey, 1956 (Hymenoptera: Torymidae). This wasp damages the drupes of the Brazilian pepper tree *Schinus terebinthifolia* Raddi, 1820 (Sapindales: Anacardiaceae) in native forests, restoration areas, and commercial crops in Brazil. Given the economic value of *S. terebinthifolia* and its applications in food seasoning, traditional medicine, cosmetics, bioactive compounds, the pharmaceutical industry, biopesticides, flavoring, and the recovery of degraded areas, there is a need to protect its drupes from *M. transvaalensis* attacks in the field. This study aimed to: i) use a physical barrier to prevent *M. transvaalensis* attacks and determine the parasitism rate in *S. terebinthifolia* drupes; ii) evaluate the drying kinetics of the drupes in the laboratory; and iii) estimate the plant's productivity in the field. Five fragments of seasonal semideciduous forest undergoing ecological restoration, with sixteen randomly selected *S. terebinthifolia* plants, were used. A physical barrier made of non-woven fabric (TNT) (25 cm long x 21 cm wide) was used as a treatment and applied for approximately 120 days. In the drying study, mature drupes were subjected to different temperatures (30°C and 105°C), with moisture content and mass reduction data fitted to exponential and hyperbolic models. For productivity estimation, data on diameter at breast height (DBH), total tree height (Ht), and crown area (Acrown) were collected from 16 individuals, applying Principal Component Analysis (PCA) to reduce dimensionality and predict yield. The parasitism rate was higher (60.45%) in the unprotected treatment and lower (8.06%) in the treatment protected with the fabric barrier, preserving the embryonic and epicarp integrity of the drupes. The hyperbolic model demonstrated statistical superiority, showing performance indicators for predicting both moisture content ($R^2_{Adj} = 0,98$; AIC = 196,52; RMSE = 0,55; $X^2_{red} = 0,308$) and mass reduction ($R^2_{Adj} = 0,954$, AIC = 254,50; RMSE = 0,706; $X^2_{red} = 0,507$), outperforming the exponential model. The drying kinetics showed a maximum initial rate of $0.7916\% \text{ h}^{-1}$ with a sharp reduction after 24h ($0.1112\% \text{ h}^{-1}$); based on the asymptotic point ($y = 1.9\%$), a period of 48 hours ($0.0421\% \text{ h}^{-1}$) was established as ideal for dehydration. Finally, the productivity modeling integrated dendrometric variables and parasitism rates monitored throughout the field study, revealing that isolated variables such as DBH ($p = 0.021$) showed instability in the models due to multicollinearity. Thus, PCA was performed, with the first component (PC1, plant vigor) standing out as the most reliable predictor of productivity (R^2_{Adj}

= 0.27; $p = 0.0204$), while the average parasitism rate by *M. transvaalensis* (P_Average) showed no significant direct linear influence on the studied sample ($n = 16$). In conclusion, the integration of physical exclusion methods and mathematical modeling establishes fundamental guidelines for post-harvest management and the reproducibility of forest restoration processes with *S. terebinthifolia*.

Keywords: Brazilian pepper tree; operational monitoring; forest pest; forest protection; exotic wasp.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição geográfica global e ocorrência de <i>S. terebinthifolia</i> no território brasileiro.	7
Figura 2 - Localização da área de estudo.	24
Figura 3 - Fluxograma das etapas operacionais da instalação das barreiras físicas (TNT) em campo à análise laboratorial das drupas de <i>S. terebinthifolia</i>	26
Figura 4 - Dissecção, limpeza e incisão das drupas de <i>S. terebinthifolia</i>	27
Figura 5 - Associação entre os tratamentos (NP e P-TNT) e estado de flutuação (flutua e submerge) das drupas de <i>S. terebinthifolia</i>	31
Figura 6 - Variação temporal na flutuabilidade de drupas de <i>S. terebinthifolia</i> em tratamentos (P-TNT e NP).	32
Figura 7 - Lesões do parasitismo por <i>M. transvaalensis</i> no epicarpo das drupas de <i>S. terebinthifolia</i>	33
Figura 8 - Associação entre os tratamentos (P-TNT e NP) com sinais de parasitismo por <i>M. transvaalensis</i> no epicarpo das drupas de <i>S. terebinthifolia</i>	34
Figura 9 - Dinâmica temporal da presença de sinais de parasitismo por <i>M. transvaalensis</i> em drupas de <i>S. terebinthifolia</i> em função dos tratamentos (P-TNT e NP) ao longo do período de estudo..	35
Figura 10 - Associação entre os tratamentos (P-TNT e NP) e os estágios de desenvolvimento de <i>M. transvaalensis</i> em drupas de <i>S. terebinthifolia</i>	36
Figura 11 - Frequência absoluta das categorias de parasitismo em drupas de <i>S. terebinthifolia</i> em função do período de estudo..	38
Figura 12 - Ciclo de vida e parasitismo de <i>M. transvaalensis</i> em drupas de <i>S. terebinthifolia</i>	39
Figura 13 - Taxa de parasitismo de <i>Megastigmus transvaalensis</i> nas unidades amostrais	41
Figura 14 - Taxa de parasitismo médio global ao longo do dias após aplicação do tratamento (DAT).	42
Figura 15 - Taxa de parasitismo <i>M. transvaalensis</i> em drupas de <i>S. terebinthifolia</i> em tratamentos (P-TNT e NP).	43
Figura 16 - Associação entre os tratamentos (NP e P-TNT) e sanidade do embrião (Danificado e não danificado).	45

Figura 17 - Sanidade do embrião de drupas de <i>S. terebinthifolia</i> em função dos tratamentos (P-TNT e NP) ao longo de período de avaliação.....	46
Figura 18. Determinação do teor de umidade (U) e cinética de secagem das drupas de <i>S. terebinthifolia</i>	70
Figura 19 - Gráfico de resíduos do modelo hiperbólico para a cinética de secagem em drupas de <i>S. terebinthifolia</i> , com valores observados versus estimados.	76
Figura 20 - Cinética de secagem de drupas de <i>S. terebinthifolia</i> ajustado ao modelo hiperbólico.	77
Figura 21 - Velocidade de perda de umidade (U) ao longo do tempo aplicado para o Ajuste hiperbólico em drupas de <i>S. terebinthifolia</i>	78
Figura 22 - Redução percentual da massa das drupas de <i>S. terebinthifolia</i> ao longo do tempo de secagem.....	80
Figura 23 - Gráficos de resíduos para o ajuste do modelo hiperbólico, aplicado a redução da massa de drupas de <i>S. terebinthifolia</i>	82
Figura 24 - Redução percentual da massa das drupas de <i>S. terebinthifolia</i> ao longo do tempo de secagem com ajuste de modelo hiperbólico.....	83
Figura 25 – Taxa de redução da massa de drupas de <i>S. terebinthifolia</i>	84
Figura 26 – Representação esquemática das variáveis dendrométricas medidas em campo para <i>S. terebinthifolia</i>	104
Figura 27 – Produção de drupas por cada indivíduo de <i>S. terebinthifolia</i> analisados em campo	109
Figura 28 - Distribuição de frequências e teste de normalidade para as variáveis dendrométricas e produtivas de <i>Schinus terebinthifolia</i>	110
Figura 29 - Matriz de correlação entre variáveis dendrométricas, bióticas e de efeito misto.....	111
Figura 30 - Gráfico de dispersão de resíduos da produtividade com as variáveis dendrométricas	112
Figura 31 - Análise de Componentes Principais (PCA) aplicada às variáveis dendrométrica...	115
Figura 32 – Biplot da PCA relacionando as variáveis dendrométricas (Acopa, DAP e Ht).....	117

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação de insetos-praga registrados para <i>S. terebinthifolia</i> e órgãos vegetais afetados.	10
Tabela 2. Características de drupas de <i>S. terebinthifolia</i> e comportamento em teste de flutuação.	26
Tabela 3 - Indicadores de eficiência diagnóstica do método de flutuabilidade aplicado a drupas de <i>S. terebinthifolia</i>	40
Tabela 4 - Parâmetros estatísticos do parasitismo por <i>M. transvaalensis</i> em drupas de <i>S. terebinthifolia</i>	44
Tabela 5 - Distribuição da sanidade do embrião de <i>S. terebinthifolia</i> em função dos tratamentos (P-TNT e NP).	44
Tabela 6 - Modelos exponencial decrescente e hiperbólico utilizados no ajuste.	71
Tabela 7 - Parâmetros para escolha de modelo ideal.	72
Tabela 8 - Comparação dos modelos hiperbólico e exponencial decrescente aplicados para o teor de umidade (U) em drupas de <i>S. terebinthifolia</i>	75
Tabela 9 - Estimativa dos parâmetros do modelo hiperbólico para teor de umidade (U) em drupas de <i>S. terebinthifolia</i>	75
Tabela 10 - Estatísticas descritivas da massa seca em gramas das drupas de <i>S. terebinthifolia</i> ...	79
Tabela 11 - Comparação dos modelos hiperbólico e exponencial aplicados para redução da massa de drupas de <i>S. terebinthifolia</i>	81
Tabela 12 - Estimativa dos parâmetros do modelo hiperbólico ajustados para a redução de massa das drupas de <i>S. terebinthifolia</i>	81
Tabela 13 - Simplificação de modelos e hipóteses testadas	107
Tabela 14 - Estatística das variáveis dendrométricas, produção e taxa de parasitismo ao longo do período para <i>S. terebinthifolia</i>	108
Tabela 16 – Coeficientes de determinação (R^2) e correlação de Pearson (r) entre a taxa de parasitismo por <i>Megastigmus transvaalensis</i> e a produtividade de sementes de <i>Schinus terebinthifolia</i> em diferentes períodos de avaliação	113
Tabela 17 - Matriz de correlação de Person entre as taxas de parasitismo ao longo do período de avaliação.	114

Tabela 18 - Diagnóstico de multicolinearidade e Fator de inflação de Variância (VIF) para variáveis independentes no modelo de produtividade.	114
Tabela 18 - Coeficientes do modelo de regressão para estimativa da produtividade baseada no vigor (PC1).....	115
Tabela 24 - Comparação de desempenho dos modelos de regressão para estimativas da produtividade de <i>Schinus terebinthifolia</i>	118

LISTA DE MATERIAIS SUPLEMENTARES

Tabela S 1. Dados de contingência para a frequências da flutuabilidade geral das drupas de <i>S. terebinthifolia</i> por <i>M. transvaalensis</i> em relação aos tratamentos (P-TNT e NP).....	162
Tabela S 2. Contagem e proporção dos sinais de parasitismo por <i>M. transvaalensis</i> em drupas de <i>S. terebinthifolia</i> em função dos tratamentos (P-TNT e NP).....	162
Tabela S 3. Matriz cruzada entre a flutuabilidade das drupas de <i>S. terebinthifolia</i> e a ocorrência de parasitismo por <i>M. transvaalensis</i>	162
Tabela S 4. Matriz cruzada entre a frequência absoluta flutuabilidade (N) e a respectiva proporção (%) e a ocorrência de parasitismo por <i>M. transvaalensis</i> em drupas de <i>S. terebinthifolia</i>	163
Tabela S 5. Frequência absoluta (#) e proporção (%) dos estádios de vida do parasita <i>M. transvaalensis</i> em função dos tratamentos (P-TNT e NP) em drupas de <i>S. terebinthifolia</i>	163
Tabela S 6. Amostras <i>S. terebinthifolia</i> por repetição, tempo e tratamento.	164
Tabela S 7. Estatística descritiva da taxa de parasitismo (%) de <i>M. transvaalensis</i> em drupas de <i>S. terebinthifolia</i> para o tratamento (P-TNT) nos períodos de avaliação (DAT).....	164
Tabela S 8. Estatística descritiva da taxa de parasitismo (%) de <i>M. transvaalensis</i> em drupas de <i>S. terebinthifolia</i> em função do controle (NP) nos períodos de avaliação (DAT).....	165
Tabela S 9. Matriz de correlação de <i>Spearman</i> para conjunto de dados do tratamento (P-TNT).	166
Tabela S 10. Matriz de correlação de <i>Spearman</i> para conjunto de dados do tratamento (NP). .	167
Tabela S 11. Critério de avaliação do ajuste dos modelos.....	168
Tabela S 12. Variáveis dendrometrias.	169
Figura S 1. Folha de <i>S. terebinthifolia</i>	170
Figura S 2. Morfologia floral de <i>S. terebinthifolia</i>	170
Figura S 3. Variação no desenvolvimento das drupas de <i>S. terebinthifolia</i> dentro da mesma infrutescência.	171
Figura S 4. Aspecto morfológico de sementes de <i>S. terebinthifolia</i> em diferentes estádios de maturação.....	172
Figura S 5. Ciclo de vida biológico de <i>M. transvaalensis</i> (Hymenoptera: Torymidae) em drupa de <i>S. terebinthifolia</i> (Sapindales: Anacardiaceae)	172

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1. Descrição botânica e fenológica de <i>Schinus terebinthifolia</i>	4
2.2. Distribuição geográfica de <i>Schinus terebinthifolia</i> : do contexto nativo ao introduzido	6
2.3. Importância ecológica e econômica de <i>Schinus terebinthifolia</i>	8
2.4. Entomofauna associada a <i>Schinus terebinthifolia</i>	9
2.4.1. <i>Megastigmus</i> : diversidade e biologia	11
2.4.2. <i>Megastigmus transvaalensis</i> : caracterização e ocorrência.....	12
2.4.2.1. Ciclo de vida de <i>Megastigmus transvaalensis</i>	13
2.5. Mecanismos de parasitismo por <i>Megastigmus transvaalensis</i>	14
2.6. O uso de agrotêxtil tecido-não-tecido (TNT) como proteção fitossanitária no manejo de insetos praga.....	17
CAPITULO I: Parasitismo da vespa exótica <i>Megastigmus transvaalensis</i> (Hymenoptera: Torymidae) em drupas de <i>Schinus terebinthifolia</i> (Sapindales: Anacardiaceae)	20
3.1. INTRODUÇÃO	22
3.2. MATERIAL E MÉTODOS	24
3.2.1. Arranjo experimental e análises laboratoriais	25
3.2.2. Análise de dados.....	27
3.3. RESULTADOS.....	30
3.3.1. Flutuabilidade de drupas de <i>Schinus terebinthifolia</i>	30
3.3.2. Efeito do agrotêxtil TNT sobre as características do epicarpo de drupas de <i>Schinus terebinthifolia</i>	33
3.3.3. Taxa de parasitismo e desenvolvimento de <i>Megastigmus transvaalensis</i> em drupas de <i>S. terebinthifolia</i>	36

3.3.4. Efeito do parasitismo por <i>Megastigmus transvaalensis</i> e da barreira física na sanidade do embrião de drupas de <i>Schinus terebinthifolia</i>	44
3.4. DISCUSSÃO.....	47
3.4.1. Influência dos tratamentos sobre a flutuabilidade das drupas de <i>Schinus terebinthifolia</i>	47
3.4.2. Influência dos tratamentos sobre sinais de dano no epicarpo de <i>Schinus terebinthifolia</i>	49
3.4.3 Influência dos tratamentos no parasitismo e ciclo de vida de <i>Megastigmus transvaalensis</i>	50
3.4.5. Influência dos tratamentos na sanidade do embrião das drupas de <i>Schinus terebinthifolia</i>	52
3.5. CONCLUSÃO	53
3.6. REFERÊNCIAS	54
CAPITULO II - Cinética de secagem de drupas de <i>Schinus terebinthifolia</i> (Sapindales: Anacardiaceae)	65
4.1. INTRODUÇÃO	67
4.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	69
4.2.1. Coleta de dados	69
4.2.2. Determinação do teor de umidade.....	69
4.2.3 Determinação da cinética de secagem.....	70
4.2.4. Análise dos dados.....	71
4.3. RESULTADOS	74
4.3.1 Cinética de secagem e ajuste de modelos matemático do teor de umidade (U) em drupas de <i>Schinus terebinthifolia</i>	74
4.3.1.1 Validação do ajuste de modelos para a redução do teor de umidade (U) de drupas de <i>Schinus terebinthifolia</i>	74
4.3.1.2 Diagnóstico estatístico por análise de resíduos para teor de umidade (U)	76

4.3.1.4 Velocidade de redução de teor de umidade (U) e determinação do tempo de estabilização cinética	77
4.3.2 Curva de redução da massa de drupas de <i>Schinus terebinthifolia</i>	79
4.3.2.1 Validação do ajuste do modelo para a redução da massa de <i>Schinus terebinthifolia</i>	80
4.3.2.2 Diagnóstico estatístico por análise de resíduos para teor de umidade (U)	81
4.3.2.3 Estabilidade e redução da massa das drupas de <i>Schinus terebinthifolia</i> ajustado ao modelo hiperbólico	82
4.4. DISCUSSÃO	85
4.4.1 Dinâmica da redução do teor de umidade (U)	85
4.4.1.1 Eficiência do modelo hiperbólico para o teor de umidade (U)	85
4.4.1.2 Análise crítica da cinética de secagem e adequação do modelo hiperbólico	86
4.4.2 Cinética de redução de massa de drupas de <i>Schinus terebinthifolia</i>	87
4.4.2.1 Eficácia do modelo hiperbólico para a redução de massa de drupas de <i>Schinus terebinthifolia</i>	87
4.4.2.1 Viabilidade tecnológica da cinética de secagem e adequação ao modelo preditivo	88
4.5. CONCLUSÕES	90
4.6. REFERÊNCIAS	91
CAPÍTULO III - Estimativa da produtividade de <i>Schinus Terebinthifolia</i> (Sapindales: Anacardiaceae)	97
5.1. INTRODUÇÃO	99
5.2. MATERIAL E MÉTODOS	103
5.2.1. Área de estudo	103
5.2.2. Seleção da amostra	103
5.2.3. Coleta de dados	103
5.2.4. Procedimentos estatísticos	105
5.2.5. Ajuste de modelos	105

5.2.6. Dominância do parasitismo sobre as variáveis dendrométricas.....	106
5.2.7. Critérios de avaliação dos modelos.....	106
5.3. RESULTADOS.....	108
5.3.1 Estatística descritiva das variáveis dendrométricas das matrizes de <i>Schinus terebinthifolia</i>	108
5.3.1. Matriz de correlação entre as variáveis dendrométricas	110
5.3.2. Definição do modelo final e estimativa dos parâmetros.....	114
5.4. DISCUSSÃO.....	119
5.4.1. Caracterização dendrométrica e variabilidade estrutural das matrizes de <i>Schinus terebinthifolia</i>	119
5.4.1.1 Relação entre a taxa de parasitismo e a produtividade de <i>Schinus terebinthifolia</i>	120
5.4.1.2 Influência do tipo de formação florestal na produtividade de drupas de <i>Schinus terebinthifolia</i>	121
5.4.2. Modelagem multivariada e eficiência dos indicadores complexos de produtividade em <i>Schinus terebinthifolia</i>	122
5.4.2.1 Análise de correlação entre as variáveis dendrométricas.....	123
5.4.3. Redução da multicolinearidade e robustez do modelo multivariado	124
5.4.4. Comparativo de desempenho e significância de modelo multivariado (PCA)	126
5.5. CONCLUSÃO	129
5.6. REFERÊNCIAS	130
6. CONCLUSÕES GERAIS	143
7. REFERÊNCIAS GERAIS.....	144
8. APÊNDICES	162

1. INTRODUÇÃO GERAL

Em meio à crise climática, é importante que estudos científicos contribuam para preservação de espécies vegetais em escala global, visto que a vegetação desempenha um papel preponderante na regularização térmica atuando como filtro essencial.

No entanto, o colapso desse equilíbrio térmico gera um efeito cascata biológico, que é o aumento da temperatura do planeta, favorecendo a reprodução dos insetos e deixa as plantas hospedeiras suscetíveis ao ataque de pragas (Mytinge et al. 1987; Panetta & McKee, 1997; Carmello-Guerra & Paoll, 1999 You et al. 2016; Lediuk et al. 2012), e esse aumento da população de insetos pode provocar impactos nas plantas, tanto benéficos ou não (Filazzola et al. 2021). Entre os benéficos, destaca-se a polinização (Chautá-Mellizo et al. 2012), particularmente em espécies dióicas (Santos et al. 2024), na qual Hymenoptera, Lepidoptera, Coleoptera e Diptera desempenham papel importante na reprodução das plantas (Cesário & Gaglianone, 2013; Hogg et al. 2020). Esse processo, resulta em maior produção de frutos e sementes (Chautá-Mellizo et al. 2012; Khalifa et al. 2021), contribuindo para o desenvolvimento de novos indivíduos e aumento das áreas verdes (Maruyama et al. 2022; Oliveira et al. 2024). Por outro lado, impactos negativos no aumento das populações de insetos são evidentes na herbívora direta (Valicente et al. 2011; Filazzola et al. 2021), afetando o crescimento das plantas, qualidade e produção dos frutos e sementes viáveis (Xia et al. 2019), o que pode colocar em risco a reprodução de novos indivíduos no campo (Chen et al. 2023).

Schinus terebinthifolia Raddi, 1820 (Sapindales: Anacardiaceae) conhecida como aroeira-vermelha ou pimenta-rosa (Carvalho, 1994; Lenzi & Orth, 2004a; Magengelele & Martin, 2023) se destaca pela importância ecológica e econômica, especialmente na comercialização de seus frutos (Incaper 2016), que são utilizados como especiarias em substituição à pimenta-do-reino, *Piper nigrum* Linnaeus, 1753 (Piperales: Piperaceae) (Rojas-Sandoval & Acevedo-Rodríguez, 2022). Os frutos de *S. terebinthifolia* são exportadas para os Estados Unidos, França, Itália, Portugal e países do oriente médio (Mack, 1991; Martínez Guerra et al. 2000; Lenzi & Orth, 2004a; Lenzi & Orth, 2004c; Fernandes et al. 2014 Incaper 2016; Ramos et al. 2020; de Souza et al. 2022). No entanto, essa planta é atacada pela vespa exótica *Megastigmus transvaalensis* Hussey, 1956 (Hymenoptera: Torymidae), praga florestal que danifica espécies de Anacardiaceae

(Habeck et al. 1989; Grissell & Prinsloo, 2001; Melo & Molin, 2024) e compromete a viabilidade das sementes dessa família de plantas (Ferreira-Filho et al. 2015; Ghiotto et al. 2019).

Estudos relataram alta taxa de parasitismo em drupas de *S. terebinthifolia* por *M. transvaalensis* (Ghiotto et al. 2019; Magengelele & Martin, 2023). Em resposta a essa problemática, estratégias de manejo dessa vespa estão sendo desenvolvidas com objetivo de identificar soluções sustentáveis para mitigar os impactos desse inseto praga em *S. terebinthifolia* no campo.

Embora, em contextos internacionais, os esforços do controle biológico visem à erradicação de *S. terebinthifolia* devido ao seu caráter invasivo (Panetta & McKee, 1997; Wheeler et al. 2016; Mc Kay et al. 2019; Byrne et al. 2021; Canavan et al. 2022a; Cuda et al. 2022; Le Falchier et al. 2025), no Brasil, essa planta é considerada benéfica e estudos com foco na proteção de *S. terebinthifolia* são realizados com especial atenção as alternativas que possam evitar o ataque de *M. transvaalensis* sem comprometer a biodiversidade local e a sustentabilidade ambiental (Ghiotto et al. 2019). No entanto, ainda são necessários estudos adicionais para desenvolver alternativas sustentáveis para o controle de *M. transvaalensis* e que garantam a conservação de *S. terebinthifolia*.

O controle químico de *M. transvaalensis* não é recomendado devido aos efeitos negativos sobre a fauna local (Soares et al. 2011) especialmente dos polinizadores e inimigos naturais, que são essenciais para regulação das pragas (Miller et al. 2021).

Nesse cenário, o controle físico com utilização de manta agrotêxtil (TNT), surge como alternativa promissora (Carmo et al. 2023), para garantir a sanidade das drupas de *S. terebinthifolia* no campo. Investigar a utilização de barreiras físicas, como por exemplo, os tecidos não tecidos (TNT) (Brunsek et al. 2023; Dragumilo et al. 2023), armadilhas adesivas (Ferreira Filho et al. 2008), pode contribuir e para o desenvolvimento de *S. terebinthifolia* e reduzir a taxa de parasitismo dos frutos dessa planta. A utilização de TNT para proteger frutos de espécies de importância econômica já foi verificada anteriormente (Rekika et al. 2008; Scarlat et al. 2017; Cărpuş et al. 2018; Marasović & Kopitar, 2019; Khramov et al. 2022; Brunsek et al. 2023) e pode também passar ser alternativa para drupas de *S. terebinthifolia* e surgir como solução prática e eficiente na redução dos danos por *M. transvaalensis* no campo.

Avaliar o impacto do parasitismo em drupas de *S. terebinthifolia* por *M. transvaalensis* no campo é fundamental para o desenvolvimento de estratégias que busquem reduzir as perdas, assim como a utilização das variáveis dendrométricas para ajustar modelos matemáticos que estimem os custos e benefícios do uso de manta agrotêxtil TNT em plantios comerciais de *S. terebinthifolia*.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Descrição botânica e fenológica de *Schinus terebinthifolia*

Schinus terebinthifolia conhecida como pimenta-brasileira, aroeira-vermelha e pimenta-rosa pertence ao filo Spermatophyta, subfilo Angiospermae e classe Dicotyledon. (Carvalho, 1994; Cuda et al. 2006; Schimitberger et al. 2018; Telmadarrehei et al. 2024; Le Falchier et al. 2024),

Essa planta possui galhos finos e castanho claros, com tricomas quando jovem (Rojas-Sandoval & Acevedo-Rodríguez, 2022), nesta fase pode atingir até 10m de altura e diâmetro à altura do peito (DAP) de até 30cm, enquanto na fase adulta pode chegar até 15m de altura e DAP de 60cm (Carvalho, 1994; Neves et al. 2016).

As folhas de *S. terebinthifolia* são largas, altamente aromáticas com cheiro resinoso (Council, 2006; Rojas-Sandoval & Acevedo-Rodríguez, 2022) compostas imparipinadas com filotaxia alternada, raque foliar cilíndrica estreitamente alada (Pireda et al. 2017), com margens internas e revolutas, de coloração verde escura com nervuras bem definidas, proeminentes e claras (Byrne et al. 2021). As folhas de *S. terebinthifolia* possuem capacidade de rebrota com maior crescimento e renovação durante as estações quentes, que coincidem com maior produção de biomassa (Hogg et al. 2020). Portanto, a produção de frutos também está diretamente associada a esses períodos (Wheeler et al. 2001), uma vez que a floração ocorre predominantemente nessa época. *Schinus terebinthifolia* é dióica (Panetta & McKee, 1997; Cesário & Gaglianone, 2013; Pireda et al. 2017; Santos et al. 2024), com flores unissexuais masculinas-estaminadas (Androceu) ou femininas-pistiladas (Gineceu) (Lenzi & Orth, 2004a; Cuda et al. 2018). As flores dessa planta apresentam, aproximadamente 4 mm de comprimento, coloração branca (Carvalho, 1994a; Cuda et al. 2006) e são localizadas em densas panículas axilares ao final de pedicelos de 1 mm de comprimento (Council, 2006; Rojas et al. 2022), contendo pistilos e pétalas bem abertas e com estrutura interna mais exposta.

As flores de *S. terebinthifolia* são melíferas e atraem insetos polinizadores (Hogg et al., 2020), principalmente Coleoptera, Diptera e Hymenoptera (Cesário & Gaglianone 2013). O florescimento dessa espécie ocorre duas vezes ao ano, primavera, verão e outono, entre outubro e

novembro e fevereiro e abril (Lenzi & Orth, 2004a). As plantas femininas emitem odor pungente característico enquanto as masculinas não, e infere-se que essa pode ser uma estratégia das plantas femininas para atrair polinizadores e potencializar a reprodução (Cuda et al. 2018; Santos et al. 2024).

A frutificação dessa espécie acontece simultaneamente a floração, podendo na mesma época encontrar plantas com botões florais, flores completas e drupas em diferentes estágios de desenvolvimento, isto é, ocorre de forma desuniforme dentro da mesma panícula (da Silva Lima et al. 2023). Geralmente, os frutos de *S. terebinthifolia* são formados com aproximadamente 15 dias após a floração, com produção dependente dos indivíduos masculinos (Neves et al. 2016), e variáveis ambientais (Nunes et al. 2008). Os frutos são inicialmente verdes quando imaturos, tornando-se rosa ou vermelho brilhante quando maduros (Lenzi & Orth, 2004a; Council, 2006), e podem produzir entre 250 e 800 frutos por panícula com aproximadamente 5 mm de diâmetro (Panetta & McKee, 1997; Treadwell & Cuda, 2007). Os frutos têm a forma de globóides, carnosos, e com drupas fechadas contendo única semente (Carvalho et al. 2013; Schimitberger et al. 2018). Quando maduro, o epicarpo fica seco com sabor apimentado, aromático e com dutos de resina (Carvalho et al. 2013; Schimitberger et al. 2018; Carneiro et al. 2024).

As sementes de *S. terebinthifolia* são pequenas com formato de rim, envoltório membranoso, liso e de coloração amarelo-clara, com uma mancha marrom escura (Panetta & McKee, 1997; Carmello-Guerra & Paoll, 1999). O embrião não é clorofilado, tem forma axial dobrada com dois cotilédones planos e carnosos (Carmello-Guerra & Paoll, 1999). Estas sementes podem entrar em dormência, retomando o metabolismo quando as condições se tornam favoráveis (Hogg et al. 2020), no entanto, esse estágio de dormência dificulta a propagação da planta (Nunes et al., 2008).

A dispersão de *S. terebinthifolia* ocorre principalmente no inverno, com as aves desempenhando importante papel nesse processo (Freitas et al. 2020), como na alimentação quando coletam os frutos na planta ou aqueles que caem no solo (Panetta & McKee, 1997).

2.2. Distribuição geográfica de *Schinus terebinthifolia*: do contexto nativo ao introduzido

Schinus terebinthifolia é nativa da Argentina, Brasil, Paraguai e Uruguai (Mc Kay et al. 2019; Carruthers et al. 2023; Bernardi et al. 2024; Le Falchier et al. 2025). Essa planta foi introduzida em mais de 20 países, como África do Sul, Austrália, Bermuda, Ilhas Fiji, Ilhas Maurício, Ilha Reunião, Micronésia, Nova Caledônia, Tahiti (Mytinger & Williamson, 1987) e no Caribe, incluindo Bahamas, Ilhas Virgens e Porto Rico dos EUA (Habeck et al. 1989), onde se tornou espécie invasora. Também foi introduzida em diversos países africanos, como Argélia, Angola, Botsuana, Egito, Quênia, Moçambique, Namíbia, Santa Helena, Tanzânia e Uganda, sendo que em alguns lugares já é considerada problemática, assim como no continente asiático, especificamente em Singapura, onde o cultivo é realizado apenas em condições controladas para evitar invasões em áreas agrícolas (Rojas-Sandoval & Acevedo-Rodríguez, 2022).

Nos EUA, *S. terebinthifolia* foi introduzida por volta de 1800 como planta ornamental (Medal et al. 1999), devido ao seu apelo estético e por possuir frutos avermelhados e brilhantes (Cuda et al. 2002a), deixando a paisagem com aspecto agradável (Carruthers et al. 2023). Essa espécie demonstrou alta capacidade de se desenvolver em ecossistemas intocados e perturbados (Wheeler et al. 2016; Martin et al. 2020;), razão pela qual foi considerada uma das piores árvores invasoras do mundo (Magengelele & Martin, 2023). A agressividade dessa planta é particularmente evidente na Flórida, Havaí e Texas, onde é considerada grande ameaça à biodiversidade (Medal et al. 1999; Wheeler et al. 2001; Mc Kay et al. 2019; Bowers et al. 2022; Cuda et al. 2022; Magengelele & Martin, 2023).

Os impactos negativos da invasão dessa planta levaram a várias tentativas de controle em diferentes regiões. Nos EUA e África do Sul foram realizadas inúmeras tentativas para erradicá-la (Wheeler et al. 2016; Mc Kay et al. 2019; Byrne et al. 2021; Enloe et al. 2021; Canavan et al. 2022; Cuda et al. 2022), e em resposta a esses esforços, o Departamento de Agricultura e Serviços ao Consumidor da Flórida classificou *S. terebinthifolia* como altamente prejudicial, levando os EUA a proibir a comercialização dessa planta (Habeck et al. 1989; Medal et al. 1999). Além disso, uma solução para controlar a invasão foi a introdução e liberação autorizadas de inimigos naturais que se alimentam exclusivamente de *S. terebinthifolia* (Le Falchier et al. 2025), na Flórida, países da América do Sul e África do Sul (Medal et al. 1999; Wheeler, 2015; Wheeler et al. 2016; Canavan et al. 2022a; Bowers et al. 2022; Wheeler et al. 2024), com mais de 6

milhões de tripes *Pseudophlothrips ichini* Hood, 1949 (Thysanoptera: Phlaeothripidae) liberados até ao momento (Le Falchier et al. 2025).

No Brasil, *S. terebinthifolia* é nativa, e está distribuída amplamente em regiões costeiras e áreas de restinga, especialmente em climas tropicais e subtropicais (Martins et al. 2021), desde Pernambuco até o sul do país (Carvalho, 1994; Mc Kay et al. 2009). A capacidade dessa planta de tolerar altas temperaturas e luz intensa contribui para sua dominância em diversas regiões (Carvalho, 1994; Degáspari et al. 2005; Bowers et al. 2022), como no Espírito Santo, onde a planta é cultivada comercialmente (com aproximadamente 1500 ha de área plantada), tornando um dos maiores produtores de frutos frescos, com produção anual entre 1.500 e 2.000 toneladas, se tornando fonte de renda para comunidades rurais (Ruas et al. 2021) (Figura 1).

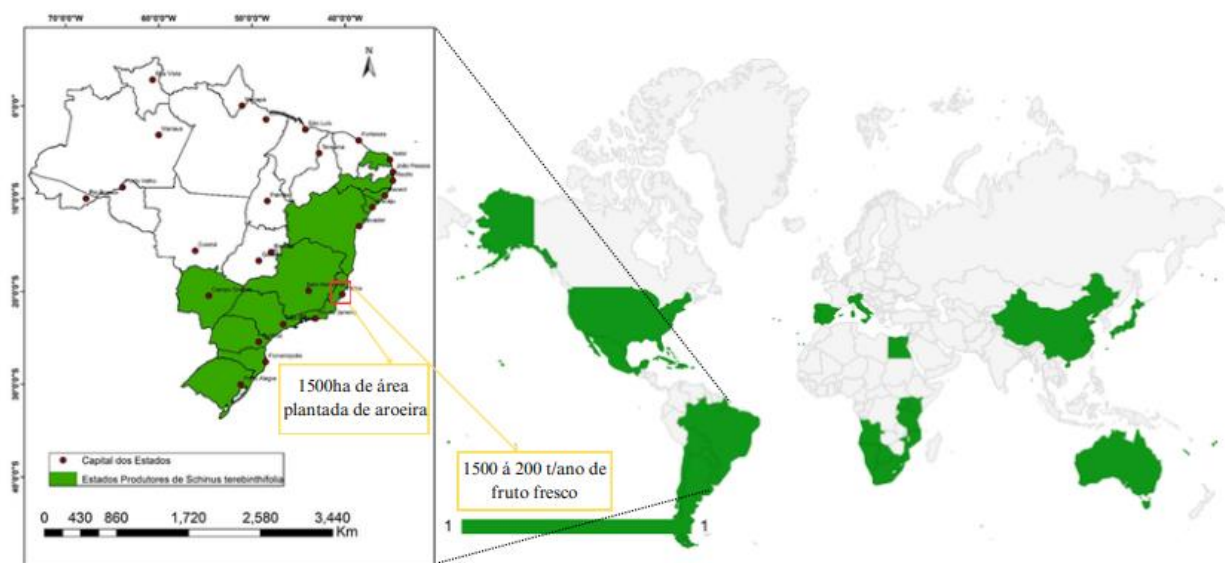


Figura 1 - Distribuição geográfica global e ocorrência de *S. terebinthifolia* no território brasileiro.

O sucesso reprodutivo e dominância de *S. terebinthifolia* em diversos ecossistemas são atribuídos à sua notável plasticidade fenotípica e adaptação a condições climáticas adversas, como temperaturas elevadas, períodos prolongados de estresse hídrico (Spector & Putz, 2006; Martins et al. 2021) e ambientes hipersalinos (Telmadarrehei et al. 2025). Essa resiliência permite que a espécie supere a vegetação nativa, especialmente em áreas degradadas. Pesquisas recentes confirmaram, inclusive, viabilidade na propagação vegetativa por meio de técnicas de estaquia e poda, processo este influenciado tanto pelas condições do ambiente de cultivo quanto pela variabilidade genotípica entre matrizes adultas (Lima et al. 2025). Adicionalmente, *S.*

terebinthifolia também apresenta elevada capacidade de regeneração, sendo capaz de rebrotar a partir de tecidos caulinares e da copa após distúrbios severos, como corte raso, incêndios e aplicação de herbicida (Cuda et al. 2006). Portanto, devido ao vigor vegetativo dessa espécie, a intensa produção dos frutos facilita a disseminação e a competição por recursos essenciais, como a radiação solar, água e nutrientes, o que é comum em espécies arbóreas nativas, resultando em alterações nos padrões de biodiversidade da flora e fauna locais (Freitas et al. 2020; Rojas-Sandoval, Acevedo-Rodriguez, 2022).

Complexa interação de fatores intrínsecos e extrínsecos modula o sucesso do processo reprodutivo de *S. terebinthifolia*, como o genótipo, estágio de maturação fisiológica, disponibilidade hídrica, propriedades edáficas e pressão exercida por insetos-praga, dessa forma a concentração e qualidade os frutos, aliadas ao histórico de manejo e ocupação do solo, tornam-se determinantes para o estabelecimento e expansão dessa espécie (Cuda et al. 2006; Barraqui et al. 2023).

2.3. Importância ecológica e econômica de *Schinus terebinthifolia*

No Brasil, *S. terebinthifolia* destaca-se nos âmbitos socioeconômicos e ecológicos. As folhas, casca, frutos e sementes dessa espécie têm múltiplas aplicações, como na alimentação humana e de animais silvestres (Rojas-Sandoval & Acevedo-Rodríguez, 2022; Vasconcelos et al. 2022; Oliveira et al. 2024). Além de sua função ornamental na arborização urbana, essa planta é importante fonte de óleo essencial de uso medicinal, culinário e energético (Carvalho, 1994; dos Santos Cavalcanti et al. 2015; Wheeler et al. 2016; Cuda et al. 2018; Martin et al. 2020; Maia et al. 2021; de Souza et al. 2022; Canavan et al. 2022; Cuda et al. 2022; Vasconcelos et al. 2022; Machado et al. 2024; oliveira et al. 2025).

O óleo extraído dessa planta é amplamente reconhecido por suas propriedades antimicrobianas, anti-inflamatórias, antifúngicas e cicatrizantes, além de ser utilizado em produtos de higiene pessoal (de Brito Marques Ramos et al. 2019; Maia et al. 2021; Nocchi et al. 2022; Bezerra, 2022). Os óleos essenciais derivados de *S. terebinthifolia* também desempenham papel significativo na saúde pública, destacando a atividade inseticida contra *Anopheles gambiae* Giles, 1902 (Diptera: Culicidae), *Anopheles arabiensis* Patton, 1905 (Diptera: Culicidae), *Culex quinquefasciatus* Say, 1823 (Diptera: Culicidae) (Kweka et al. 2011) e também contra larvas de

Stegomyia aegypti Linnaeus, 1792 (Diptera: Culicidae) (Pratti et al. 2015), tornando-se alternativa para o controle de vetores responsáveis pela transmissão de doenças como malária e dengue, respectivamente.

As sementes dessa planta também desempenham importante papel na cadeia ecológica, como fonte de alimento para aves (Gomes et al. 2013; Oliveira et al. 2025), e utilizadas na produção de mudas para restauração de áreas degradadas (Alonso et al. 2022), devido à robustez, e desenvolvimento em solos com baixa fertilidade, considerada espécie pioneira em processos de recuperação ambiental (De Souza et al. 2022).

Extrato foliar de *S. terebinthifolia* mostrou potencial no controle biológico de pragas agrícolas como *Plutella xylostella* Linnaeus, 1758 (Lepidoptera: Plutellidae) no cultivo de couve, brócolis e repolho, com propriedades larvicidas e inibidoras de oviposição (Couto et al. 2019; Silva et al. 2019; Arajo et al. 2020; Bernardi et al. 2024; Souza et al. 2025). Esse potencial bioinseticida e biofungicida da *S. terebinthifolia* ampliam suas aplicações no manejo de pragas e doenças como míldio, oídio, antracnose e fusariose, tornando-se alternativa promissora para a agricultura sustentável, garantindo a segurança alimentar (Ngegba et al. 2022; Bernadi et al. 2024; Cenobio-Galindo et al. 2024).

Os frutos da *S. terebinthifolia* são usados pelas comunidades extrativistas como fonte de renda (Carneiro et al. 2024; Leite et al. 2025), e comercializados por aproximadamente US\$ 0,60 por quilo no território nacional, enquanto no mercado internacional o preço pode atingir até US\$ 101,49 por quilo (Incaper 2016; de Souza et al. 2022).

2.4. Entomofauna associada a *Schinus terebinthifolia*

O aumento das áreas ocupadas por *S. terebinthifolia* impulsionou estudos sobre métodos de controle químico e biológico, incluindo o uso de inimigos naturais como os parasitoides. No entanto, essas estratégias não apresentaram a eficácia esperada (Cassani, 1986; Mc Kay et al. 2009a). Mesmo diante do insucesso no controle deliberado, a espécie permanece suscetível ao ataque de pragas e doenças (Tabela), que comprometem a parte da estrutura da planta, como folhas, ramos e tronco, onde esses danos nos tecidos vegetais prejudicam o seu desenvolvimento e produtividade dos frutos.

Tabela 1 – Relação de inseto-praga registradas para *S. terebinthifolia* e órgão vegetais afetados.

Inseto praga	Danos	Referência
<i>Calophya terebinthifolia</i> Burchhardt & Basset, 2000 (Hemiptera: Calophyidae)	Ninfas completam seu desenvolvimento em galhos expostos, formando galhas que funcionam como sumidouros de nutrientes, impactando no desenvolvimento e reprodução.	Cuda et al. 2022
<i>Heteroperreyia hubrichi</i> Malaise, 1957 (Hymenoptera: Pergidae)	Larvas alimentam-se de folhas de <i>S. terebinthifolia</i> na Argentina (Província de Misiones) quanto no Brasil (Rio Grande do Sul), podendo causar danos significativos às plantas e afetar o crescimento e vitalidade.	McKay et al. 2019
<i>Ceroplastes grandis</i> Hempel, 1900 (Hemiptera: Coccidae)	Ninfas e adultos danificam a parte aérea de <i>S. terebinthifolia</i> , com a sucção da seiva que pode causar necrose das folhas.	Link et al. 1984; Vinha et al. 1983 <i>apud</i> Carvalho, 1994
<i>Pseudophilothrips ichini</i> (Hood), 1949 (Thysanoptera: Phlaeothripidae)	Alimentam-se de folhas que são produzidas durante a estação vegetativa do hospedeiro afetando a vitalidade da planta, devido a morte do meristema apical, sendo considerado um dos principais agentes de controle biológico desta planta.	Wheeler et al. 2016; Wheeler et al. 2022; Bowers et al. 2022; Le Falchier et al. 2025; Telmadarrehei et al. 2025
<i>Oncideres saga</i> Dalman, 1823 e <i>O. dejeani</i> Thomson, 1868 (Coleoptera: Cerambycidae)	Fêmeas atacam ramos e galhos fazendo cortes para deposição dos ovos e após a eclosão, as larvas se alimentam de tecido interno, enfraquecendo-os, reduzindo a capacidade fotossintética, causando a redução da produtividade, dispersão de sementes e regeneração de novas plantas.	Carvalho, 1994
<i>Hymenomima</i> nr. <i>memor</i> (Warr.) (Lepidoptera: Geometridae)	As lagartas se alimentam das folhas de <i>S. terebinthifolia</i> .	Broggi, Cortador & Rodas, 2016
<i>Megastigmus transvaalensis</i> Hussey, 1956 (Hymenoptera: Torymidae)	Vespa exótica ataca drupas de <i>S. terebinthifolia</i> , comprometendo a viabilidade do embrião e a integridade da semente.	Scheffer & Grissell, 2003; Ferreira-Filho et al. 2022; Melo & Molin, 2024).

2.4.1. *Megastigmus*: diversidade e biologia

O gênero *Megastigmus* conta com 154 espécies descritas (Noyes, 2019), e é reconhecido como um dos maiores dentro da recente família Torymidae, pertencente à superfamília Chalcidoidea da ordem Hymenoptera, com a entomofauna brasileira relatando 10.971 espécies descritas, no entanto estima-se que existam cerca de 70 mil (Fernández, 2022; Melo & Molin, 2024).

A ordem Hymenoptera compreende 111 famílias, 8.423 gêneros e aproximadamente 154.000 espécies, com a maioria delas sendo vespas parasitoides (Bennett, 2021; Fernández 2022). Caracterizada por uma ampla diversidade morfológica (Bennett, 2021; Melo & Molin, 2024), essa ordem inclui também diversos grupos de insetos fitófagos (Jansen-González et al. 2020; Bennett 2021; Popescu & Gostin; 2023).

Chalcidoidea abriga grande diversidade, com aproximadamente 500.000 espécies, incluindo vespas parasitoides (Noyes, 2003, 2019), as quais dependem de um hospedeiro em algum estágio do ciclo de vida para o seu pleno desenvolvimento (Janšta et al. 2018; Valicente et al. 2022) e são destacados como insetos pequenos com aproximadamente 3 mm de comprimento (Noyes, 2003, 2019). Além disso, conta com mais de 100 espécies de *Megastigmus* registradas, onde mais de 80% estão distribuídas nas regiões Paleártica, Oriental e Australiana e com apenas sete reconhecidas na região Afrotropical (Roques et al. 2016; Popescu & Gostin, 2023). Os calcidoides são considerados como importantes agentes de controle biológico de pragas agrícolas e estão associados a 44 famílias de plantas, e 339 famílias de insetos hospedeiros em 15 ordens diferentes (Noyes, 2003).

Torymidae por sua vez, inclui aproximadamente 1000 espécies de vespas, com apenas 30 registradas no Brasil e distribuídas em sete gêneros. Espécies dessa família tem aproximadamente 1 a 8 mm de comprimento, frequentemente chamam atenção pela coloração metálica ou amarela (Popescu & Gostin, 2023) e ovipositores proporcionalmente longos (Melo & Molin, 2024). Os Torymidae são ecologicamente diversos, apresentando associações de hospedeiros diferentes, até mesmo ao nível do gênero (Janšta et al. 2018). Esses insetos são holometábolos com diversas fases do ciclo de vida, ocupando diferentes nichos ecológicos e contribuindo para o aumento da diversidade dentro da mesma família (Jansen-González et al.

2020a). Torymidae destaca-se, também, por se alimentar de sementes (Doğanla et al 2013; Roques et al. 2016), característica incomum entre vespas e contam com quatro espécies do gênero *Megastigmus* que parasitam plantas da família Anacardiaceae (Grissell & Prinsloo 2001; Roques et al. 2016), como *M. transvaalensis*.

2.4.2. *Megastigmus transvaalensis*: caracterização e ocorrência

Em 1988, *M. transvaalensis*, desconhecido para os EUA, foi recuperado e criado a partir de drupas de *S. terebinthifolia* coletadas em Palm Beach County (Habeck et al. 1989). Essa vespa fitófaga (Doğanlar et al. 2013; Roques et al. 2016), originária da África do Sul (Melo & Molin, 2024), mediterrâneo e Oriente Médio (Grissell & Prinsloo, 2001), está associada às sementes de plantas (Cuda et al. 2002; Scheffer & Grissell, 2003).

Megastigmus transvaalensis parasita drupas de plantas da espécie do gênero *Rhus* *angustifolia* L., *Rhus laevigata* L., *S. terebinthifolia*, *Schinus molle* L. (Sapindales: Anacardiaceae), e *Searsia* FA Barkley (Anacardiaceae) na África do Sul (Cuda et al. 2002; Grissell and Prinsloo 2001; Wheeler et al. 2001; Roques et al. 2016; Scheffer & Grissell, 2023; Magengelele & Martin 2023; Melo & Molin, 2024), *Schinus polygamus* (Cav.) Cabrera no Chile (Fernandes et al. 2014) e *S. terebinthifolia* no nordeste do México em Coahuila, Nuevo León e Tamaulipas (Ruíz-Cancino, Coronado-Blanco, & García-Jiménez, 2011), EUA (Habeck, Bennett & Grissell, 1989), Paraná (Perioto, 1999) e São Paulo, Brasil (Ferreira-Filho et al. 2015). *M. transvaalensis* também foi relatada em Maurício, com o seu aparecimento no Parque Nacional Black River Gorges e Medine (Ganeshan & Madl, 2015).

Megastigmus já foi relatado em *Eucalyptus*, Charles Louis L'Héritier de Brutelle, 1789 (Myrtales: Myrtaceae) na Austrália (Le et al. 2020), *Cupressus duclouxiana*, Camillo Karl Schneider, 1917 (Cupressales: Cupressaceae) e *Juniperus tibetica*, Nathaniel Lord Britton, 1895 (Cupressales: Cupressaceae) em Mengzi - Yunnan na China (Kuang et al. 2023b), *Pistacia vera*, Carl Linnaeus, 1753 (Sapindales: Anacardiaceae) na Itália (Roques et al. 2016; Bonsignore 2023).

No Brasil, a vespa *M. transvaalensis* foi introduzida acidentalmente, identificada no Paraná e São Paulo, representando ameaça para *S. terebinthifolia* (Habeck, Bennett, & Grissell, 1989; Ferreira-Filho et al. 2015; Ghiotto et al. 2019), especialmente em regiões onde a coleta de

sementes tem fins comerciais, como no caso do Espírito Santo (Incapar, 2016), onde foi relatada a uma década (Santos et al. 2017).

2.4.2.1. Ciclo de vida de *Megastigmus transvaalensis*

O ciclo de vida de *M. transvaalensis* tem início com a deposição dos ovos no interior das drupas de *S. terebinthifolia* na fase jovem, com aproximadamente 10 a 15 dias após a polinização (Cuda et al. 2002; González & Pereira, 2013). Neste estágio, a cápsula da drupa de *S. terebinthifolia* é delicada e as sementes ainda estão macias (Cuda et al. 2002; Nestlé et al. 2023), com embrião no início da fase cotiledonar (S. Jansen-González, 2013), proporcionando condições ideais para oviposição.

Aproximadamente 1 a 5 ovos são depositados por drupa (Milliron, 1949), com tamanho máximo de 0,2 mm de comprimento e 0,1 mm de largura (Jansen-González, 2013), de coloração branco acinzentado, com superfície lisa, forma elíptica (Milliron 1949; Cuda, Wheeler, & Habeck, 2011), pontiagudo na extremidade mistral e achatado lateralmente (González & Pereira, 2013), com curto período de incubação (Cuda et al. 2002; Jansen-González et al. 2020) e se desenvolvem junto com o embrião da semente, ligados pelo pedúnculo à camada interna do tegumento (Jansen-González, 2020).

As larvas de *M. transvaalensis* de primeiro instar possuem corpo mole e eclodem, aproximadamente em 4 a 5 dias (Cuda et al. 2002), atacando o embrião da semente e alimentando-se do endosperma (González & Pereira, 2013). Durante o desenvolvimento, que ocorre em cinco instares ao longo de 20 a 25 dias (Jansen-González, 2013), as larvas apresentam comportamento de canibalismo fraternal, eliminando-se mutuamente à medida que os recursos da semente se esgotam, sobrevivendo apenas a larva mais forte (Boivin et al. 2008; Cuda et al. 2011; Jansen-González et al. 2020). No último instar, possuem 13 segmentos corporais e ausência de apêndices, atingindo a fase de pupa.

As pupas de *M. transvaalensis* apresentam formação inicial dos apêndices (Jansen-González, 2013, 2020), como os olhos, pernas e divisões do corpo (Popescu & Gostin, 2023). As pupas permanecem em diapausa (6 à 18 meses), estratégia de sobrevivência em condições ambientais desfavoráveis (Wheeler et al. 2001; Cuda et al. 2002; Jansen-González et al. 2020),

depois tornam-se vespas adultas coincidindo com a fase de floração de *S. terebinthifolia* (Cuda et al. 2011).

Na fase adulta *M. transvaalensis* emerge da semente deixando um orifício arredondado de saída (Ferreira-Filho et al. 2015). A anatomia de *M. transvaalensis* já foi amplamente descrita em estudos anteriores (Milliron 1949; Doğanlar et al. 2013; González & Pereira 2013; Jansen-González et al. 2020; Cuda et al. 2002a). Algumas características morfológicas do adulto são fundamentais para a identificação dos machos e fêmeas, especialmente devido à variação em tamanho e coloração.

Os machos de *M. transvaalensis* medem entre 2,3 á 2,9 mm, enquanto as fêmeas são maiores, com de 3,1 a 3,4 mm de comprimento (Cuda et al., 2011). O maior tamanho das fêmeas deve-se ao comprimento do abdômen, que varia de 1,2 a 1,4 mm, e ao ovipositor, que mede entre 1,5 e 1,9 mm (Cuda et al. 2002; Cancino et al. 2009; Doğanlar et al. 2013; Ferreira-Filho et al. 2015; Roques et al. 2016; Popescu & Gostin, 2023).

As fêmeas de *M. transvaalensis* produzem entre 10 e 25 ovos, com tamanhos variando de 0,99 á 1,5 mm (Cuda et al. 2002). A coloração das fêmeas dessa espécie é geralmente amarelo-acastanhada clara (Cuda et al. 2002), enquanto os machos apresentam maior variação, podendo ser pretos ou de cor escura (Roques et al. 2016). Em alguns casos, os machos exibem corpo amarelo com manchas dorsais pretas e cor laranja nos três últimos tergitos, ou um tom amarelo-acastanhado (Ruíz-Cancino et. Al. 2011b; Doğanlar et al. 2013). Ambos os sexos possuem olhos avermelhados e asas com um grande estigma e mancha marrom ao redor (Roques et al. 2016).

O tempo de vida média das femeas adultas de *Megastigmus* é de aproximadamente 10 dias no campo (Boivin et al. 2008), dependendo das condições ambientais e é sincronizado com o período de frutificação, que acontece no inverno e primaveira (Cuda et al. 2002), garantindo o parasitismo das sementes recém-formadas.

2.5. Mecanismos de parasitismo por *Megastigmus transvaalensis*

O parasitismo é uma interação ampla entre espécies e abrange diversas formas de relacionamento, como comensalismo, mutualismo e simbiose (Jansen-González et al. 2012), que envolve o hospedeiro, parasitoide e ambiente, e precisam obrigatoriamente de um hospedeiro

para completar o seu desenvolvimento larval (Westwood et al. 2010; Jansen-González et al. 2012; González & Pereira, 2013), mas não estabelecem relação de dependência, isto é, se tornam facultativos quando atingem a fase adulta.

Megastigmus transvaalensis atua como parasita de *S. terebinthifolia* (fitoparasita por destruir sementes), relação que pode ser tratada do ponto de vista evolutivo com seleção de hospedeiros com base em suas características morfofisiológicas (Gonçalves et al. 2003; Zhang et al. 2022). Enquanto os parasitoides se destacam em vários grupos de insetos (Cuny et al. 2021), especialmente em Hymenoptera (Pennacchio & Strand, 2006; Fernández, 2022b).

As interações parasita-hospedeiro são complexas, com parasitoides atacando em diferentes estágios de vida do hospedeiro (Valicente, 2022), e dividem-se em idiobiontes e coinobiontes (Pennacchio & Strand 2006; Cuny et al. 2021; Miller et al. 2021; Cuny & Poelman, 2022). Essa interação frequentemente desencadeia uma coevolução dinâmica, refletida também nos Hymenoptera, onde os mecanismos de parasitismo variam, entre polifagismo e oligofagismo, adaptados ao hospedeiro (Kuang et al. 2023).

O parasitismo em *S. terebinthifolia* por *M. transvaalensis* é resultado de um processo de mudança de hospedeiro. Considerando que, o parasitoide coinobionte (Janse-González et al. 2020), as larvas de *M. transvaalensis* desenvolvem-se no interior das drupas sem interromper imediatamente o crescimento do hospedeiro embora causem impactos negativos ao longo do ciclo (Cuny et al. 2021; Miller et al. 2021), permanecendo no interior do fruto até a fase de pupa (Pennacchio & Strand, 2026). E na fase adulta, o inseto apresenta a vida livre e o comportamento alimentar oligófago, restringindo-se geralmente a espécies da família Anacardeaceae (Grissell & Prinsloo, 2001; Roques et al. 2016; Cuny et al. 2021).

Os hábitos bioecológicos de *M. transvaalensis* o tornam particularmente propenso à invasão e fácil dispersão, pois como a maior parte de seu desenvolvimento ocorre dentro da semente (Pennacchio & Strand, 2006), sua presença geralmente é ignorada em lotes de sementes comercializados, sendo detectadas quando são submetidas a germinação, uma vez que a vespa em sua fase larval permanece em diapausa por período de 6 a 12 meses (Rasplus et al. 2010; Ferreira-Filho et al. 2015; Fernandes et al. 2014b).

Os parasitoides são excelentes indicadores biológicos (Valicente, 2022), devido a sensibilidade as alterações ambientais (Querino et al. 2011), o que revela que estes organismos necessitam de condições ótimas do meio para o desenvolvimento. Dessa forma, *M. transvaalensis* depende de certas condições como disponibilidade de semente (Jansen-González 2013; Jansen-González et al. 2020a), umidade relativa, temperatura adequada, variações climáticas extremas (Ghiotto et al. 2019), fotoperíodo (Wheeler et al. 2001; Boivin et al. 2008), e ausência de competidor (Hogg et al. 2020).

Sementes imaturas de *S. terebinthifolia* ou espécies de Anacardiaceae (Grissell & Prinsloo, 2001; Ferreira-Filho et al. 2015), permitem que o ovipositor da fêmea dessa vespa alcance o interior das sementes para depositar seus ovos (S. Jansen-González et al. 2020a), onde as larvas quando eclodem consomem o endosperma (Von Aderkas et al. 2005; Jansen-González et al. 2012).

A umidade relativa adequada (60 a 80%) e temperaturas (20 a 30°C) são favoráveis para o sucesso do parasitismo de *M. transvaalensis* em drupas de *S. terebinthifolia* (Ghiotto et al. 2019; Filazzola et al. 2021). Além disso, a exposição das pupas ao fotoperíodo de 12 horas (Wheeler et al. 2001; Boivin et al. 2008), antes de se dispersarem no ambiente favorece a emergência de vespas adultas (Ruíz-Cancino et al. 2011b; Ghiotto et al. 2019).

Por outro lado, variações climáticas extremas, como secas prolongadas ou chuvas torrenciais, podem afetar negativamente o parasitismo, pois, as sementes nestas condições ficam dormentes (Hogg et al. 2020), no caso das sementes de *S. terebinthifolia*, a dormência pode ser mantida por temperaturas inadequadas (Ribeiro et al. 2023). Na África do Sul, sementes viáveis de *S. terebinthifolia* apresentaram taxa de parasitismo causada por *M. transvaalensis* de até 80%, com maior número de sementes danificadas nos meses de inverno, em relação as outras estações, com taxas que oscilaram entre 12 a 35% (Canavan et al. 2022).

No Brasil, drupas de *S. terebinthifolia* coletadas em 14 municípios do Espírito Santo (dados não publicados) apresentaram 64% de danos causados por *M. transvaalensis* (Santos et al. 2017). Enquanto em Sorocaba, São Paulo, a taxa de parasitismo foi 55% em áreas de restauração ecológica (Ferreira-Filho et al. 2015) e na mesma região, observado taxa de parasitismo variando de zero a 36,3% em fragmentos de floresta estacional semidecidual (Ghiotto et al. 2019).

Portanto, esses percentuais para além de ser preocupante, destacam também a importância da interação entre *S. terebinthifolia* e *M. transvaalensis* na dinâmica de populações da planta hospedeira, podendo ter implicações significativas para reprodução da planta hospedeira e na disseminação da espécie praga.

Além disso, a dispersão de *M. transvaalensis* pelo Brasil pode representar uma grande ameaça à regeneração natural de *S. terebinthifolia*, e comprometer o estabelecimento de novos indivíduos dessa planta (Grissell & Prinsloo, 2001), para além de reduzir a produção de sementes principalmente no Espírito Santo, onde a produção acontece em larga escala (Ghiotto et al. 2019; Ruas et al. 2021; Wheeler et al. 2001).

2.6. O uso de agrotêxtil tecido-não-tecido (TNT) como proteção fitossanitária no manejo de insetos praga

O agrotêxtil tecido-não-tecido (TNT) é produzido com fibras de polipropileno em diversas gramaturas, e representa inovação na agricultura global (Cărpuş et al. 2018), pois atua como barreira física contra pragas e é considerado uma estratégia dentro do manejo integrado de pragas (MIP) (Restrepo-Osorio et al. 2019).

Variedade de fibras utilizadas como poliolefina, poliamida, poliéster, juta, lã, coco, sisal e linho são utilizadas na fabricação do agrotêxtil (Bairagi et al. 2016; Dorugade et al. 2023). O uso desse material é relatado como altamente resistente (Restrepo-Osorio et al. 2019), permeável ao ar e água, protege contra insetos-praga em condições adversas e tem longa durabilidade, dependendo do tipo de fibra utilizada na sua fabricação (Bairagi et al. 2016; Chowdhury, Nasrin, & Faruque, 2017; Marasović & Kopitar, 2019; Khramov et al. 2022b; Dorugade et al. 2023).

A utilização do agrotêxtil é recomendada para proteção de culturas e frutos, sendo aplicado diretamente sobre o fruto ou cultura após o plantio (Medeiros et al. 2007; Guedri, Jaoudi, & Msahli, 2022; Dorugade et al. 2023), além disso, esse material pode ser utilizado diretamente no solo para melhorar a retenção de umidade, reduzir troca gasosa com o ambiente externo, reter orvalho na superfície e manter umidade elevada dentro da área de cultivo (Ponce et al. 2021).

Estudos comprovaram a eficácia desse material no controle de plantas daninhas (Dorugade et al. 2023), na melhoria da qualidade das culturas e no aumento do valor nutricional de hortaliças e frutas, o que se reflete na maior produtividade (Carmo et al. 2023). Além disso, o agrotêxtil contribuir para a redução da taxa de evaporação da água, sua utilização em condições de seca é relevante para a sustentabilidade da produção e também diminuição do uso de agrotóxicos (Grangeiro et al. 2005; Medeiros et al. 2007, 2008; Chowdhury et al. 2017; Manna et al. 2018; Carmo et al. 2023; Dragumilo et al. 2023; Lazarević et al. 2024).

Agricultores do Norte da África testaram diversos materiais para proteger frutos de tamareira *Phoenix dactylifera* L. 1753, (Arecaceae), e entre os materiais avaliados, o agrotêxtil destacou-se, proporcionando melhorias significativas na frutificação e na qualidade dos frutos, em comparação com outros métodos utilizados (Guedri et al. 2022).

No Brasil, em Mossoró, Rio Grande do Norte o agrotêxtil é recomendado para cobertura de canteiros baixos no cultivo de hortaliças, promovendo melhorias na produtividade e qualidade das plantas (Grangeiro et al. 2005). Esse material também contribui para o controle de *Plutella xylostella*, Linnaeus, 1758 (Lepidoptera: Plutellidae) e *Diabrotica speciosa*, Germar, 1824 (Coleoptera: Chrysomelidae), no cultivo de couve durante períodos de chuva, além de diminuir a infestação de colônias de pulgões (Hemiptera: Aphididae) por planta na estação seca, resultando em menor necessidade de aplicação de inseticidas (Ponce et al., 2021).

A utilização do agrotêxtil também tem mostrado potencial para acelerar o processo de maturação de frutos (maçã, pera, uva, manga, murango, laramja, limões, banana, melões, tamaneira e tomate), pois além de promover o crescimento das plantas ao aliviar o estresse térmico, estimula a fotossíntese (Medeiros et al. 2007; Rekika et al. 2008; Teixeira et al. 2011; Khramov et al. 2022). Contudo, a retirada do material no momento adequado é crucial, pois a remoção tardia pode causar mudanças fisiológicas nas plantas ou frutos (Santos et al. 2014).

A eficiência agrícola e florestal do agrotêxtil, ainda possui a vantagem de ser biodegradável (Restrepo-Osorio et al. 2019), tornando alternativa ecologicamente correta o que reduz seu impacto ambiental a longo prazo (Scarlat et al. 2017; Marasović & Kopitar, 2019). Essa característica, aliada ao crescente mercado de agrotêxteis, reforça seu papel como solução sustentável para a agroindústria (pelo baixo custo operacional), onde as projeções indicam

crescimento significativo (4,7% por ano) do setor até 2028, indicando que o uso desse material possa contribuir para a segurança alimentar global (Kopitar et al. 2022), pela otimização dos procedimentos de manejo e redução de agrotóxicos.

CAPITULO I: Parasitismo da vespa exótica *Megastigmus transvaalensis* (Hymenoptera: Torymidae) em drupas de *Schinus terebinthifolia* (Sapindales: Anacardiaceae)

RESUMO

Megastigmus transvaalensis Hussey, 1956 (Hymenoptera: Torymidae) é uma vespa exótica que danifica drupas de *Schinus terebinthifolia* Raddi, 1820 (Sapindales: Anacardiaceae) em áreas de floresta nativa, restauração ecológica e cultivo comercial no Brasil. Assim, o controle sustentável dessa praga florestal representa um desafio importante para a conservação dessa espécie nativa no campo. O objetivo desse estudo foi utilizar barreira física como método de proteção contra o ataque de *M. transvaalensis* no campo e caracterizar o epicarpo das drupas quanto à ocorrência de danos. O experimento foi conduzido em floresta estacional semidecidual em restauração, com 16 plantas de *S. terebinthifolia* monitoradas e submetidas a dois tratamentos; ramos com drupas de *S. terebinthifolia* não protegidas (controle) e protegidas com manta agrotêxtil TNT (testemunha), durante oito meses (dois ciclos de frutificação de *S. terebinthifolia*). Coleta mensal de 75 drupas de *S. terebinthifolia* por tratamento foi realizada e subdividida em três repetições. A utilização do agrotêxtil reduziu as taxas de parasitismo (8,06%) nas drupas de *S. terebinthifolia* protegidas em comparação as não protegidas (60,04%). O teste de flutuabilidade apresentou baixa eficiência como indicador de parasitismo (F1-score 35%), devido ao valor reduzido da especificidade (3,5%). Em contrapartida, o uso do agrotêxtil como método de controle físico de *M. transvaalensis* mostrou-se eficaz na prevenção de danos às drupas de *S. terebinthifolia*, contribuindo para preservação dessa espécie nativa e manutenção do equilíbrio dos ecossistemas onde essas plantas estão presentes.

Palavras-chave: aroeira-pimenteira, agrotêxtil, controle sustentável, praga florestal

ABSTRACT

Megastigmus transvaalensis Hussey, 1956 (Hymenoptera: Torymidae) is an exotic wasp that damages the drupes of *Schinus terebinthifolia* Raddi, 1820 (Sapindales: Anacardiaceae) within areas of native forest, ecological restoration, and commercial cultivation in Brazil. Consequently, the sustainable control of this forest pest represents a significant challenge for the field conservation of this native species. This study aimed to utilise physical barriers as a

protection method against *M. transvaalensis* attacks in the field and to characterise the drupe epicarp regarding the occurrence of damage. The experiment was conducted in a seasonal semi-deciduous forest under restoration, monitoring 16 *S. terebinthifolia* plants subjected to two treatments: unprotected branches (control) and branches protected with a non-woven fabric (NWF) agrotextile (treated), over eight months (encompassing two *S. terebinthifolia* fruiting cycles). A monthly collection of 75 drupes per treatment was performed, subdivided into three replicates. The use of the agrotextile reduced parasitism rates to 8.06% in protected drupes, compared to 60.04% in those left unprotected. The floatation test demonstrated low efficiency as an indicator of parasitism. These results indicate that employing agrotextiles as a physical control method for *M. transvaalensis* prevents damage to *S. terebinthifolia* drupes, thereby contributing to the preservation of this native species and the maintenance of ecosystem equilibrium where these plants occur.

Keywords: sustainable control, Brazilian peppertree, agrotextile, monitoring, forest pest.

3.1. INTRODUÇÃO

O monitoramento sustentável de pragas florestais é essencial para preservar a biodiversidade, especialmente diante do aumento de espécies-praga exóticas invasoras que comprometem ecossistemas naturais e plantados (Balla et al. 2021; Zhou et al. 2024). Estratégias de manejo integrado de pragas (MIP) têm diminuído os prejuízos causados por insetos fitófagos, especialmente quando associadas a práticas sustentáveis que reduzam o uso de agrotóxicos e preservem os inimigos naturais (Zhang et al. 2022; Tinoco et al. 2023). Nesse contexto, métodos de controle físico surgem como alternativas promissoras por apresentarem baixo impacto ambiental e potencial aplicação em sistemas florestais (Alves & Oliveira, 2018; Karlsson et al. 2020).

Schinus terebinthifolia Raddi, 1820 (Sapindales: Anacardiaceae), conhecida como aroeira-vermelha ou pimenta-rosa, é nativa do Brasil, de grande importância ecológica e econômica e amplamente utilizada na recuperação de áreas degradadas e na comercialização de seus frutos (Ghiotto et al. 2019; Costa et al. 2022; Gomes et al. 2022). Essa espécie, entretanto, é severamente atacada pela vespa exótica *Megastigmus transvaalensis* Hussey 1956 (Hymenoptera: Torymidae), que parasita as sementes e compromete sua viabilidade, representando ameaça para a regeneração natural e para produção de sementes (Ferreira-Filho et al. 2015; Ghiotto et al. 2019).

Megastigmus transvaalensis é fitófaga (Doğanlar et al. 2013; Roques et al. 2016), originária da África do Sul (Melo & Molin, 2024), mediterrâneo e Oriente Médio (Grissell & Prinsloo, 2001), é um inseto que parasita drupas de *Rhus angustifolia* L., *Rhus laevigata* L. (Sapindales: Anacardiaceae), *S. terebinthifolia*, *Schinus molle* L. (Sapindales: Anacardiaceae), e também está associada ao gênero nativo *Searsia* FA Barkley (Anacardiaceae) na África do Sul (Cuda et al. 2002; Grissell and Prinsloo 2001; Magengelele & Martin 2023a; Roques et al. 2016; Scheffer & Grissell, 2003; Wheeler et al. 2001). *M. transvaalensis* tem ampla distribuição geográfica, e recentemente foi registrado pela primeira vez na Cidade de México, Estado de México, Puebla e Morelos onde parasitaram sementes de *Schinus molle* Linnaeus, 1753 (Lomeli-Flores et al. 2025).

Altas taxas de parasitismo por *M. transvaalensis* já foram registradas em diferentes países como África do Sul, Brasil e EUA (Santos et al. 2012; Fernandes et al. 2014; Ferreira -Filho et

al. 2015; Ghiotto et al. 2019; Canavan et al. 2022), e recentemente no México e Grécia (Lomelli-Flores et al. 2025; Koutsoukos et al. 2025), indicando o potencial impacto dessa espécie sobre populações de *S. terebinthifolia* em ambientes naturais e restaurados (Wheeler et al. 2001; Hight et al. 2003; Canavan et al. 2022; Magengelele & Martin, 2023).

Apesar disso, métodos de controle sustentáveis para *M. transvaalensis* ainda são pouco explorados (Magengelele, 2020), o que preocupa devido a sua facilidade de dispersão e assim a necessidade de intervenção imediata, buscando evitar que os danos causados por essa praga ultrapassem o limite de dano econômico (Prudêncio et al. 2025). O MIP surge como alternativa técnica e ambientalmente viável, pois está estruturado na integração de métodos de controle biológico, mecânico, químico e físico, dessa forma aplicado de forma seletiva e criteriosa, respeitando os limites ecológicos que se alinham às diretrizes do desenvolvimento sustentável (Ferreira & da Silva et al. 2025).

A eficiência do MIP no controle de *M. transvaalensis* enfrenta desafios, pois devido ao comportamento das larvas dessa espécie completarem o ciclo de vida no interior das drupas de *S. terebinthifolia*, acabam ficando protegidas na fase mais vulnerável, tornando o controle químico inviável. Considerando as limitações das estratégias químicas e impactos negativos sobre organismos não alvo, assim como a ausência de inimigos naturais estabelecidos para o controle biológico desta vespa no Brasil, o uso de barreira física com agrotêxtil pode representar alternativa promissora para reduzir o ataque de insetos praga e preservar a integridade das sementes (Soares et al. 2011; Miller et al. 2021; Brunsek et al. 2023). O objetivo desse estudo foi avaliar a eficiência do uso de barreira física no parasitismo de *M. transvaalensis* em drupas de *S. terebinthifolia* no campo.

3.2. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido na área experimental de preservação ecológica, dentro do *campus* da Universidade Federal de São Carlos, em Sorocaba, São Paulo, Brasil (23°21'-23°35' S e 47°17'- 47°36' W). O *Campus* tem de área de 10,46 ha com cobertura vegetal composta por Floresta Estacional Semidecidual e Cerrado (Koga et al. 2022). (Figura 1). Esta região apresenta clima tropical quente, com médias superiores a 23°C e úmido, caracterizado por invernos secos e verões chuvosos, com precipitação média anual de 1.300mm a 1.400mm (Köppen, 1948; Climate-Data.org, 2021).

A *S. terebinthifolia* é dioica (Panetta & McKee, 1997; Cesário & Gaglianone 2013; Santos et al. 2024). Flores em diferentes alturas foram coletadas e transportadas para o laboratório a fim de identificar os órgãos reprodutivos presente (flores masculinas e femininas). Este processo consistiu em identificar os estames e carpelos (Carmello -Guerreiro & Paolli, 1999b; Lenzi & Orth 2004a, 2004b; Cuda et al. 2018), em seguida foram demarcamos as plantas com flores femininas (Figura 2).

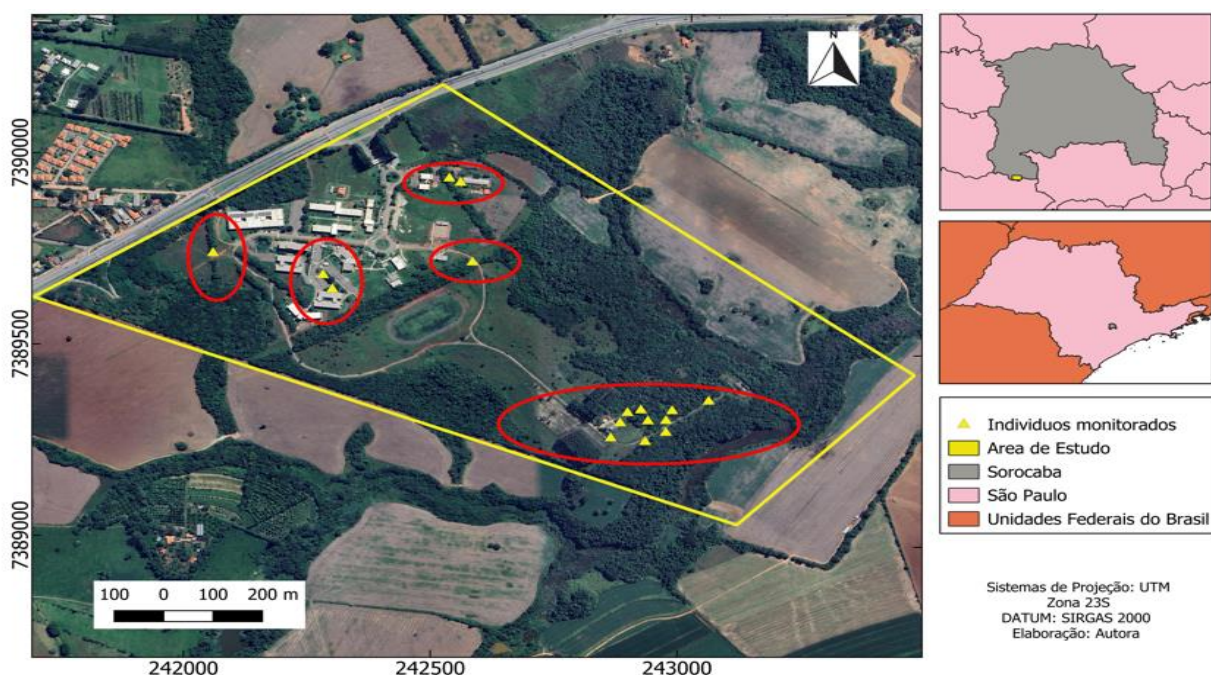


Figura 2 - Localização da área de estudo.

3.2.1. Arranjo experimental e análises laboratoriais

O estudo foi conduzido em arranjo comparativo pareado, com indivíduos de *S. terebinthifolia* como unidade amostral, ao longo de dois ciclos de frutificação da espécie, o primeiro entre primavera (seca-chuva) (26/06/2023 a 24/10/2023) e o segundo entre verão (chuva-seca) (19/12/2023 a 04/04/2024). Um total de 16 indivíduos de *S. terebinthifolia* foi aleatoriamente selecionado e aplicado os tratamentos. O controle (Não protegido: NP) consistiu na seleção aleatória e marcação com fita adesiva de 12 panículas por unidade amostral e o segundo realizado com a seleção aleatória e proteção física (Protegido: P-TNT) de 12 panículas com manta agrotêxtil TNT (21x25 cm) (cobertas e amarradas com ajuda de um barbante) por unidade amostral, totalizando 24 subamostras em cada indivíduo de *S. terebinthifolia* no campo. Esse arranjo permitiu a comparação dos tratamentos dentro do mesmo indivíduo e reduziu parte da variabilidade associada às diferenças entre plantas de *S. terebinthifolia* considerando o estágio de desenvolvimento da panícula verde e atendendo que não foi feita uma avaliação prévia de infestação.

As avaliações foram realizadas durante oito meses (em dois ciclos de frutificação) e aproximadamente 30 dias após a instalação do experimento, realizada coleta de dois ramos por unidade amostral, um com panícula não protegida (NP) e outro com panícula protegida (P-TNT) para seleção aleatória em laboratório de 75 drupas de *S. terebinthifolia* e divididas em três repetições (25 drupas por amostra) por tratamento. A divisão da amostra de cada planta de *S. terebinthifolia* em três repetições por tratamento foi utilizada como subamostra de processamento, e não como unidade experimental independente. Um total de 9600 drupas de *S. terebinthifolia* foi avaliado durante os dois ciclos de frutificação (30, 60, 90 e 120 dias após aplicação do tratamento - DAT), a fim de verificar a eficácia da barreira física em impedir o ataque de *M. transvaalensis* e determinar a taxa de parasitismo em drupas de *S. terebinthifolia*.

Todas as subamostras (3 repetições/tratamento/árvore) foram submetidas aos testes de: (i) flutuabilidade das drupas, (ii) avaliação da integridade do epicarpo, (iii) detecção de parasitismo das drupas e (iv) verificação da sanidade do embrião. Os procedimentos adotados seguiram adaptações de Wheeler et al. (2001), Brasil (2009), Da Silva (2012) e Ribeiro et al. (2023).

O teste de flutuabilidade é um método rápido de triagem, foi empregado como método diagnóstico para inferir a ocorrência da infestação e avaliar a qualidade fisiológica das sementes a partir do comportamento das drupas de *S. terebinthifolia* quando imersas em água, além de verificar a confiabilidade do método na determinação do parasitismo das drupas dessa planta. As amostras foram colocadas em recipiente de vidro com 150 ml de água destilada por 15 minutos. Posteriormente, o comportamento das drupas foi observado, e contabilizado as que submergiram (afundaram) e as que permaneceram na superfície (flutuaram) (Ribeiro et al. 2023) (Figura 3) (Tabela 3).

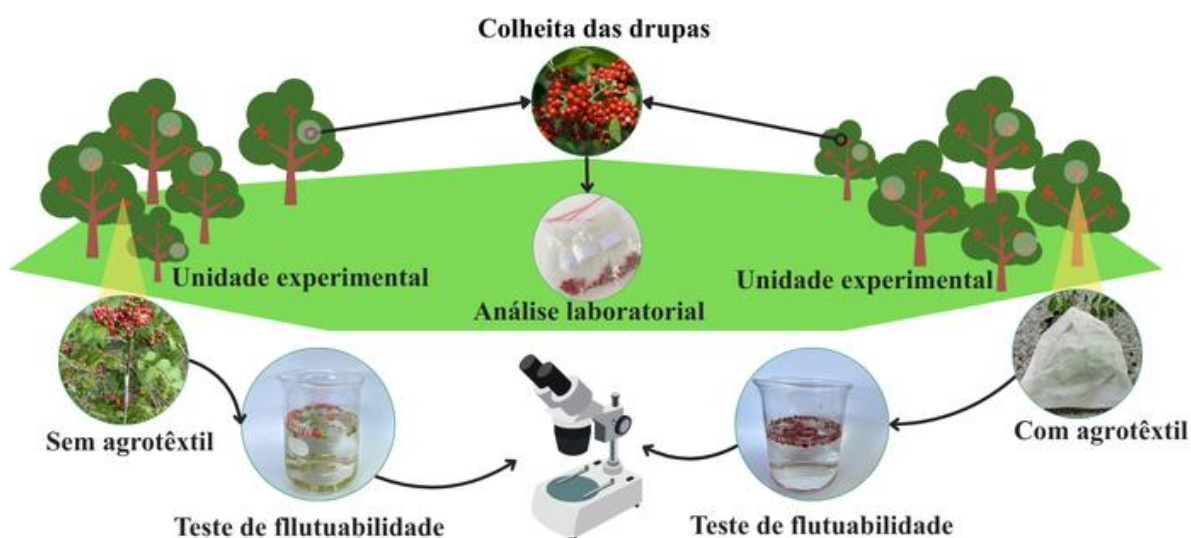


Figura 3 - Fluxograma das etapas operacionais da instalação das barreiras físicas (TNT) em campo à análise laboratorial das drupas de *S. terebinthifolia*. Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com auxílio das ferramentas Canva e Gemini (Google).

Tabela 2. Características de drupas de *S. terebinthifolia* e comportamento em teste de flutuação.

Comportamento	Características	Interpretação
Submerge	Maior densidade, drupa bem formada, drupa hidratada, pericarpo fino, tecido denso, ausência de ar nos tecidos, drupa em maturação intermediaária, drupa não parasitada	Maior probabilidade de ser viável.
Flutua	Drupa vazia, drupa mau formada, pericarpo espesso, espaço intercelular ou bolsa de ar nos tecidos, drupa desidratada, drupa madura com alterações estruturais e danificadas (parasitadas)	Maior probabilidade de ser inviável.

Fonte: adaptado Malone,1967; Daneshvar et al. 2017; Zhang et al. 2018; Tkachenko et al. 2022; Lavrenov et al. 2025.

A região da parte externa do epicarpo de cada drupa de *S. terebinthifolia* foi verificada, e a existência de sinais de parasitismo por *M. transvaalensis* (i. e integridade classificada como cicatriz, orifício ou ausência de lesões) contabilizada.

O parasitismo foi calculado com a dissecação, limpeza do pericarpo e incisão da semente (Lomelli-Flores et al. 2025), com auxílio de estilete, na região da micrópila (região de emergência radicular) e, então observada em lupa estereoscópica a presença das fases do ciclo de vida de *M. transvaalensis* de (ovo, larva, pupa e adulto). Todo material utilizado foi armazenado em recipientes de vidro com álcool 70%. A sanidade do embrião das drupass de *S. terebinthifolia* foi classificada em danificado ou não danificado (Figura 4).



Figura 4 - Dissecação, limpeza e incisão das drupas de *S. terebinthifolia*.

3.2.2. Análise de dados

Considerando a natureza do experimento, cada árvore de *S. terebinthifolia* foi considerada como unidade amostral biológica, enquanto as drupas dessa espécie constituíram subamostras destinadas à caracterização da resposta de cada indivíduo em cada tratamento e data de avaliação. Os resultados foram interpretados com ênfase em padrões comparativos entre o tratamento não protegido (NP) e protegido (P-TNT), considerando a magnitude e consistência das diferenças observadas ao longo das coletas. O resultado das análises estatísticas realizadas serviu como apoio à identificação de associações entre tratamento e variáveis avaliadas, com a interpretação inferencial conduzida com cautela diante da estrutura hierárquica dos dados.

Os dados foram organizados em planilha eletrônica e analisados no ambiente R (R Core Team, versão 4.4.1). O fator experimental principal foi o tratamento, com dois níveis: drupas não protegidas (NP) e protegidas (P-TNT). As variáveis resposta categóricas incluíram flutuabilidade (flutuou ou submergiu) (Ribeiro et al. 2023), características externas dos frutos (Wheeler et al. 2001; Brasil, 2009), parasitismo (ausência, presença ou fases do ciclo de vida de *M. transvaalensis*) e sanidade do embrião (danificado ou não danificado) (Brasil, 2009). As análises foram conduzidas considerando o conjunto total de observações quanto avaliações estratificadas por período (30, 60, 90 e 120 dias após o tratamento - DAT).

A associação entre tratamento e variáveis categóricas foi avaliada com tabelas de contingência e testes de independência. Inicialmente, teste do qui-quadrado de Pearson (χ^2), com verificação das frequências esperadas foi aplicado (Andriola, 2001; Abreu et al. 2018; Gurvich & Naumova et al. 2025). Quando necessário, os resultados foram confirmados pelo teste exato de Fisher ou teste da razão de verossimilhança (G-test) (Bolboacă et al. 2011; Ruxton & Neuhauser, 2013), com nível de 5% de probabilidade. A magnitude das associações foi estimada pelo coeficiente V de Cramér, cuja interpretação seguiu critérios convencionais: efeitos muito fracos (0 – 0,05); fraco (0,05 – 0,10); moderado (0,10 – 0,15); forte (0,15 – 0,25); muito forte (0,25 – 1,00) (Dias et al. 2023).

Com intuito de sistematizar a compressão das interações estruturais das associações, mosaic plots com áreas proporcionais às frequências observadas e coloração baseada nos resíduos padronizados de *Pearson* foram utilizados, nos quais células em azul indicaram frequências observadas superiores às esperadas sob independência, enquanto células em vermelho frequências inferiores. A intensidade da cor refletiu a magnitude do desvio. Gráficos de barras com frequências absolutas também foram utilizados para estatística descritivas. Para a variável binária sanidade do embrião, além do teste χ^2 , foi estimada a razão de chances (odds ratio, OR) com intervalo de confiança de 95%, permitindo quantificar o efeito do tratamento sobre a probabilidade de ocorrência de embriões não danificados.

Na ausência de normalidade comprovada com o teste de Shapiro-Wilk ($p < 0,05$), as diferenças entre os tratamentos (NP e P-TNT) foram analisadas pelo teste não paramétrico de Wilcoxon para amostras pareadas ($N=16$). Os dados foram utilizados para apresentação dos

resultados e construção de gráficos, para facilitar a compressão e interpretação biológica referentes as taxas de infestação.

A taxa de parasitismo (TP) foi calculada como a proporção de drupas de *S. terebinthifolia* parasitadas em relação ao total avaliado, com a expressão $TP = (N^{\circ}DP + N^{\circ}DO / N^{\circ}TDA) \times 100\%$, em que $N^{\circ}DP$ representou a soma do número de drupas com presença de ovo, larva, pupa ou adulto de *M. transvaalensis*, $N^{\circ}DO$ número de drupas ou semente com orifício de saída do adulto e $N^{\circ}TDA$ o número total de drupas da planta avaliada. Essa métrica foi calculada por tratamento e período de avaliação.

Adicionalmente, a capacidade preditiva da flutuabilidade como indicador indireto de parasitismo foi avaliada por com a construção de matrizes de confusão entre flutuabilidade e presença de parasitismo. A partir dessas matrizes, indicadores de desempenho foram estimados, incluindo sensibilidade, especificidade, acurácia e F1-score, com proporções calculadas por linha. Para avaliar a eficiência do teste de flutuabilidade como indicador de parasitismo, foi utilizada uma matriz de confusão, a partir da qual foram calculadas Acurácia Global (Acurácia Global = Verdadeiros Positivos + Verdadeiros negativos) / Total) e a Acurácia Balanceada (Acurácia Balanceada = (Sensibilidade + Especificidade) / 2). A Acurácia Global representou a taxa total de acertos do método, enquanto a Acurácia Balanceada foi utilizada para ajustar possíveis desequilíbrios na proporção de amostra entre drupas parasitados vs. não parasitados, fornecendo assim uma métrica mais robusta do desempenho do teste (Abdu et al. 2022; Elghryani et al. 2025).

3.3. RESULTADOS

3.3.1. Flutuabilidade de drupas de *Schinus terebinthifolia*

As comparações entre os tratamentos não protegido (NP) e protegido (P-TNT) evidenciaram diferenças consistentes na frequência de drupas com sinais de parasitismo, integridade do epicarpo, flutuabilidade e condição do embrião ao longo do período de avaliação. De modo geral, as drupas protegidas apresentaram padrões mais favoráveis quando comparadas às drupas expostas, indicando associação entre a proteção física das drupas e a redução dos efeitos atribuídos ao dano de *M. transvaalensis*.

Considerando todo o período de avaliação foi possível observar associação significativa entre tratamento e flutuabilidade ($\chi^2 = 70,60$; gl = 1; $p < 0,001$), embora com tamanho de efeito pequeno (Cramér's $V = 0,086$). No conjunto geral ambos tratamentos apresentaram valores baixos, com drupas protegidas apresentaram maior proporção de submersão (4,90%) em comparação às não protegidas (1,79%). Isso foi validado pelo teste exato de Fisher ($p < 0,001$), indicando que drupas protegidas apresentaram aproximadamente 2,8 vezes mais chance de submergir em relação às não protegidas (odds ratio = 2,81; IC95%: 2,18–3,66). O *mosaic plot* mostrou maior frequência observada de submersão no tratamento protegido e menor frequência no não protegido em relação ao esperado (Figura 5A). A análise dos resíduos padronizados de Pearson indicou desvios positivos para a combinação “protegida-submersa” e negativos para “não protegida-submersa” (Figura 5B), reforçando que a associação observada foi impulsionada principalmente pelo aumento da submersão no grupo protegido.

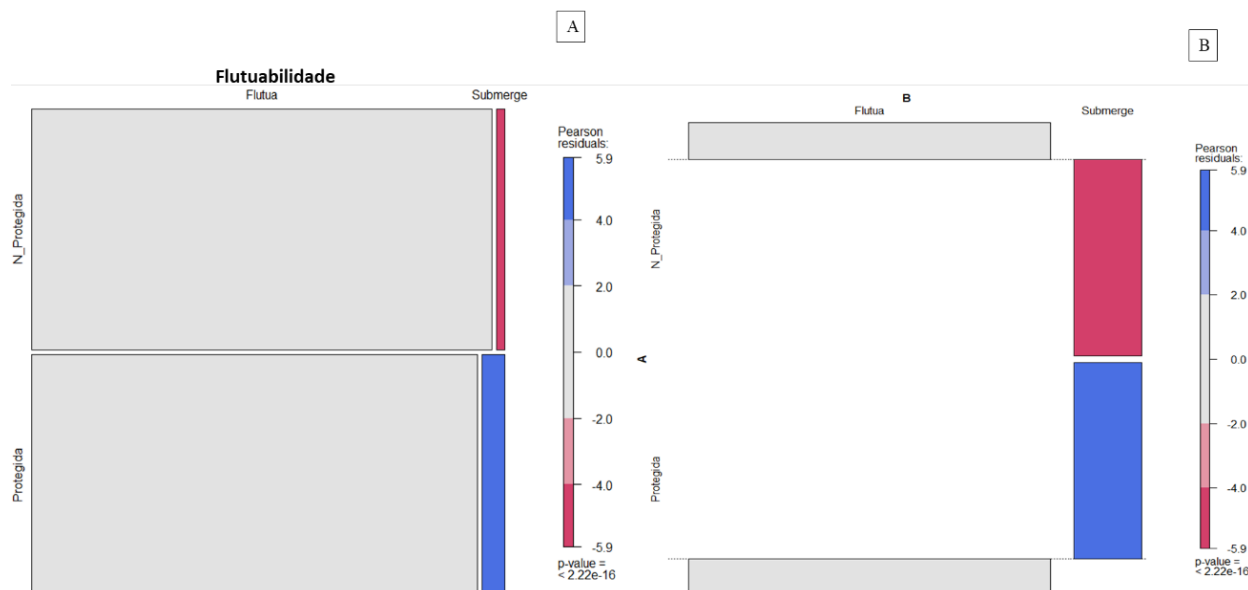


Figura 5 - Associação entre os tratamentos (NP e P-TNT) e estado de flutuação (flutua e submerge) das drupas de *S. terebinthifolia*. A - Mosaico com áreas proporcionais às frequências observadas. B - Associação dos resíduos padronizados entre a condição de proteção e estado de flutuação, baseado nos resíduos padronizados de Pearson. Células em azul indicam frequências observadas maiores que as esperadas sob independência, enquanto células em vermelho frequências menores que as esperadas. A intensidade da cor indica a magnitude do desvio em relação ao esperado ($p < 0,001$).

Associação forte e significativa foi verificada aos 30 DAT ($\chi^2 = 67,55$; $gl = 1$; $p < 0,001$; Cramér's $V = 0,170$) (Figura 6A). Nesse período, drupas protegidas apresentaram taxa de submersão de 9,92%, enquanto as não protegidas 1,92%, correspondendo a aproximadamente 5,6 vezes maior chance de submersão das protegidas (odds ratio = 5,63; IC95%: 3,55–9,29). Aos 60 DAT (Figura 6B), a associação permaneceu significativa, porém com menor magnitude ($\chi^2 = 29,76$; $gl = 1$; $p < 0,001$; Cramér's $V = 0,113$). A proporção de submersão foi de 8,33% para drupas protegidas (P-TNT) e 3,08% naquelas não protegidas (NP), indicando aumento aproximado de 2,9 vezes na chance de submersão sob proteção (P-TNT) (odds ratio = 2,86; IC95%: 1,92–4,33). A partir dos 90 DAT (Figura 6C), a associação deixou de ser significativa ($\chi^2 = 2,47$; $gl = 1$; $p = 0,116$; Cramér's $V = 0,037$). Nesse período, as taxas de submersão foram baixas e semelhantes entre os tratamentos (1,17% não protegidas e 0,50% protegidas). Padrão similar foi observado aos 120 DAT (Figura 6D), sem evidência de associação entre tratamento e flutuabilidade ($\chi^2 = 0,046$; $gl = 1$; $p = 0,830$; Cramér's $V = 0,009$), com frequências residuais de

submersão inferiores a 1% em ambos os tratamentos. Em conjunto, os resultados indicaram que o efeito do tratamento sobre a flutuabilidade foi mais pronunciado nos períodos iniciais de avaliação, reduzindo-se progressivamente ao longo do tempo até desaparecer nos estágios finais do desenvolvimento das drupas de *S. terebinthifolia*.

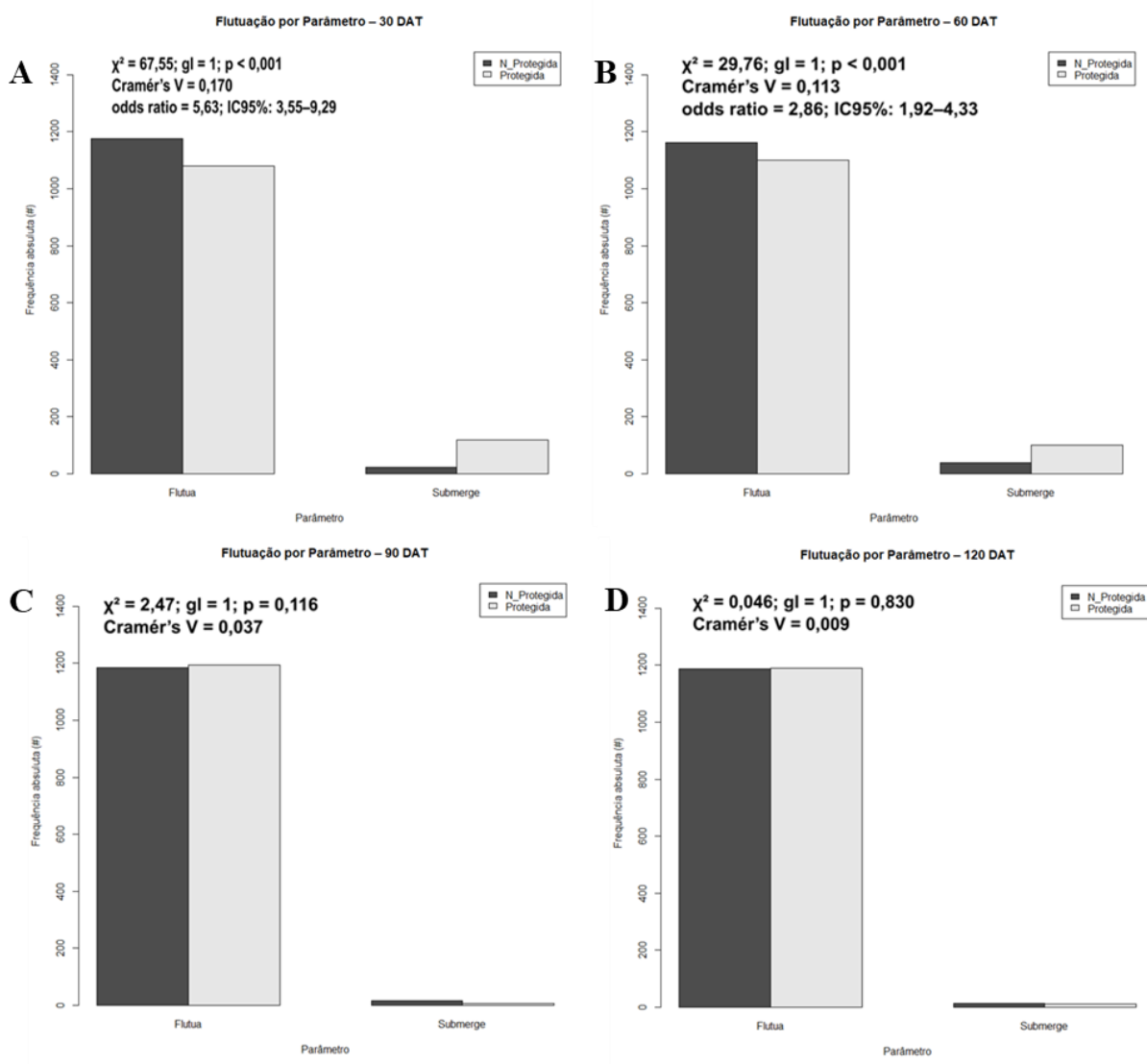


Figura 6 - Variação temporal na flutuabilidade de drupas de *S. terebinthifolia* entre os tratamentos (P-TNT e NP). As barras representam a contagem absoluta de drupas flutuantes e submersas em cada período de estudo: (A) 30 DAT, (B) 60 DAT, (C) 90 DAT e (D) 120 DAT. As diferenças entre os tratamentos foram avaliadas independentemente para cada período usando testes qui-quadrado de independência ($p < 0,05$).

3.3.2. Efeito do agrotêxtil TNT sobre as características do epicarpo de drupas de *Schinus terebinthifolia*

Sinais externos de parasitismo nas drupas de *S. terebinthifolia* foram categorizados como cicatriz de oviposição, orifício de saída do adulto de *M. transvaalensis* ou ausência de característica visível no epicarpo (Figura 7).

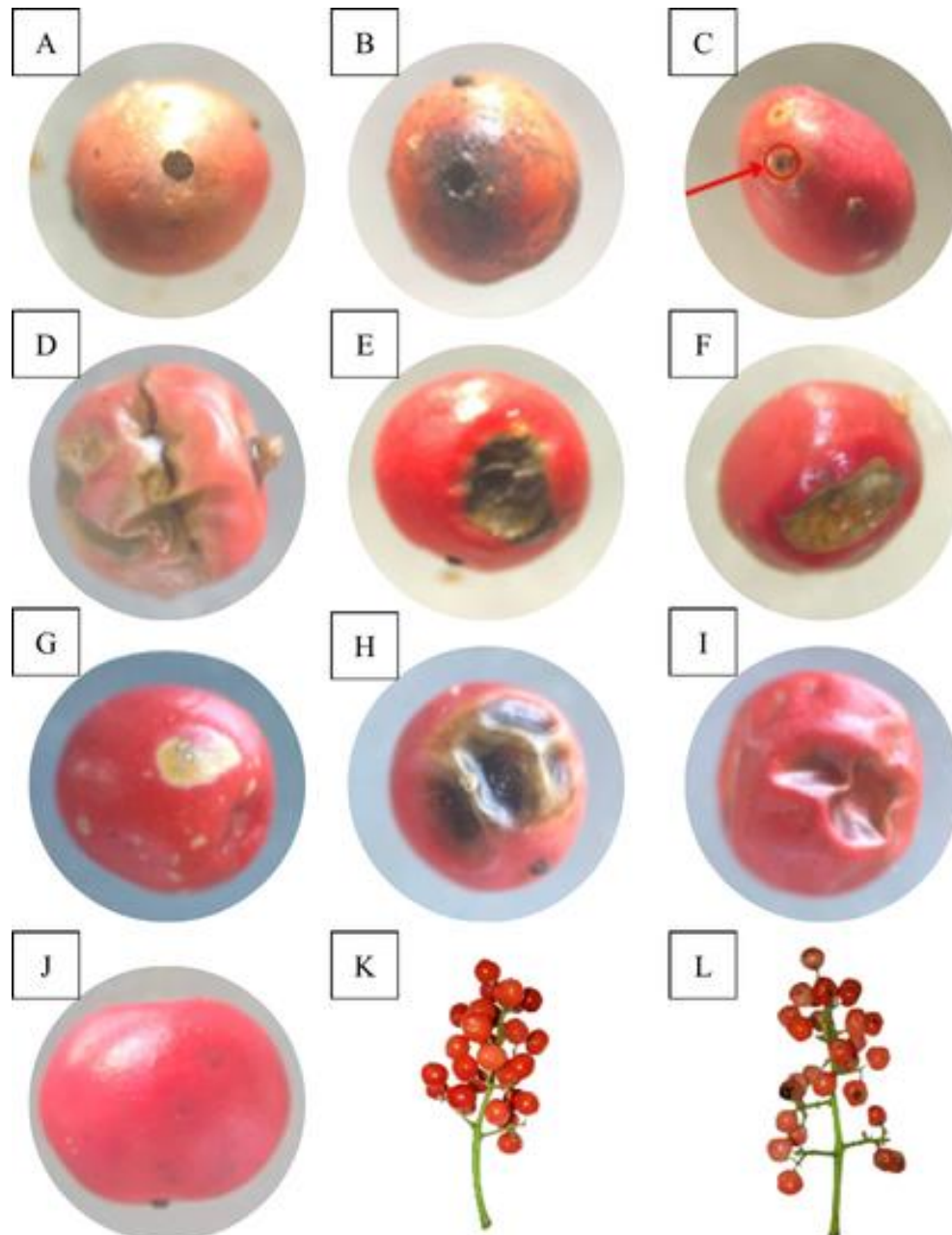


Figura 7 - Lesões do parasitismo por *M. transvaalensis* no epicarpo das drupas de *S. terebinthifolia*. A-C: orifício; D-I: cicatriz. J: sem sinais de parasitismo; K: drupas no tratamento protegido (P-TNT); e L: drupas no tratamento não protegido (NP).

Associação significativa entre tratamento e características do epicarpo ($\chi^2 = 3077,5$; gl = 2; $p < 2,2 \times 10^{-16}$) foi observada, com tamanho de efeito elevado (Cramér's V = 0,57), indicando forte dependência entre as variáveis. Drupas não protegidas (NP) apresentaram maior frequência de cicatrizes (46,2%) e orifícios (29,7%), enquanto as protegidas (P-TNT) apresentaram predominância de ausência de sinais externos (79,6%). As drupas protegidas (P-TNT) apresentaram 3,3% de orifícios e 17,0% de cicatrizes no epicarpo (Material Suplementar, Tabela S2; Figura 8A). A análise dos resíduos padronizados de Pearson indicou que a associação foi impulsionada principalmente pelo excesso de drupas de *S. terebinthifolia* sem características de ataque por *M. transvaalensis* no tratamento P-TNT, enquanto que teve um excesso de cicatrizes e orifícios de emergência no tratamento NP (Figura 8B).

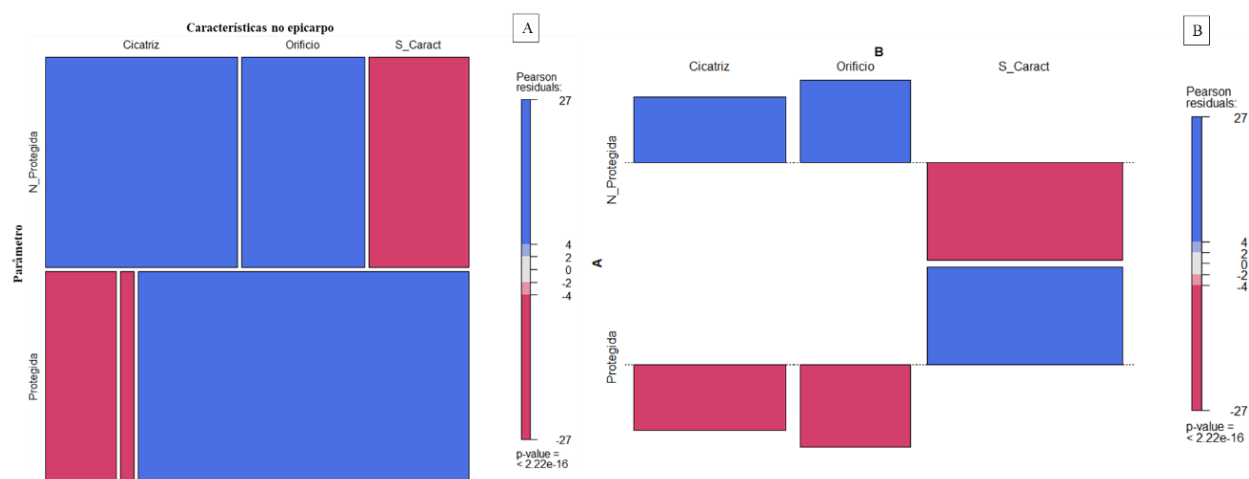


Figura 8 - Associação entre os tratamentos (P-TNT e NP) com sinais de parasitismo por *M. transvaalensis* no epicarpo das drupas de *S. terebinthifolia*. A - Mosaico com áreas proporcionais às frequências observadas. B - Associação dos resíduos padronizados entre a condição de proteção e os sinais de parasitismo, baseado nos resíduos padronizados de Pearson. As cores representam resíduos padronizados de Pearson, indicando frequências acima (cor azul) ou abaixo (cor vermelho) do esperado pelo acaso.

A associação entre tratamento e características do epicarpo foi verificada no período de estudo (30 DAT: $\chi^2 = 685,61$; gl = 2; $p < 2,2 \times 10^{-16}$; V = 0,53 (Figura 9A); 60 DAT: $\chi^2 = 650,63$; gl = 2; $p < 2,2 \times 10^{-16}$; V = 0,52 (Figura 9B); 90 DAT: $\chi^2 = 803,40$; gl = 2; $p < 2,2 \times 10^{-16}$; V = 0,58 (Figura 9C); e 120 DAT: $\chi^2 = 1007,30$; gl = 2; $p < 2,2 \times 10^{-16}$; V = 0,65 (Figura 9D)). A

magnitude do efeito foi elevada em todos os períodos, com aumento progressivo ao longo do tempo, indicando intensificação do efeito entre os tratamentos. As drupas de *S. terebinthifolia* protegidas (P-TNT) apresentaram predominância de ausência de injúrias externas, enquanto drupas não protegidas (NP) com maior frequência de cicatrizes e orifícios, evidenciando maior incidência de parasitismo na ausência de proteção física (Figura 9).

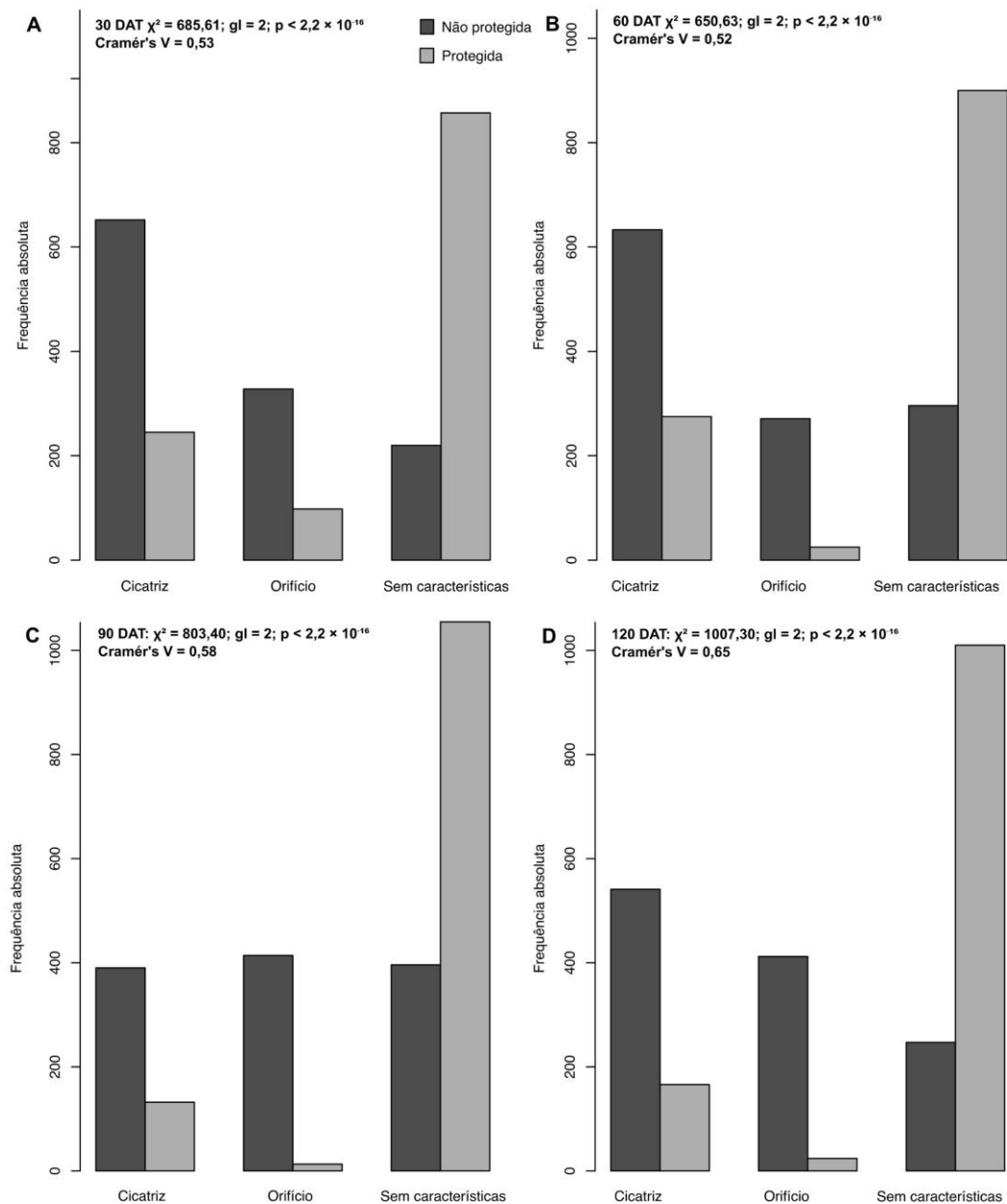


Figura 9 -Dinâmica temporal da presença de sinais de parasitismo por *M. transvaalensis* em drupas de *S. terebinthifolia* em função dos tratamentos (P-TNT e NP) ao longo do período de

estudo. Frequência absoluta das drupas aos 30 (A), 60 (B), 90 (C) e 120 DAT (D). A significância das associações foi testada pelo teste de Qui-quadrado ($p < 0,05$).

3.3.3. Taxa de parasitismo e desenvolvimento de *M. transvaalensis* em drupas de *S. terebinthifolia*

A distribuição das fases do ciclo de vida de *M. transvaalensis* (ovo, larva, pupa, adulto) e ausência de parasitismo diferiu entre os tratamentos protegido (P-TNT) e não protegido (NP) ($\chi^2 = 1502,22$; $gl = 4$; $p < 2,2 \times 10^{-16}$), com magnitude de associação moderada a elevada (Cramér's $V = 0,40$) (Figura 10 A). No tratamento protegido (P-TNT) predominância quase absoluta da categoria “ausente” (95,27%), foi observada.

A análise dos resíduos padronizados de Pearson mostrou que, no tratamento P-TNT, a categoria “ausente” ocorreu com frequência superior à esperada sob hipótese de independência, enquanto todas fases do ciclo de vida de *M. transvaalensis* apresentaram frequências inferiores às esperadas (Figura 10 B). No tratamento NP, observou-se padrão inverso, com excesso significativo de indivíduos nas diferentes fases do parasitoide (Figura 10 B). O teste da razão de verossimilhança corroborou o resultado ($G = 1688,2$; $gl = 4$; $p < 2,2 \times 10^{-16}$), confirmando a dependência entre proteção física e desenvolvimento do inseto. Esse padrão confirma que a associação estatística observada não se deve a flutuações aleatórias, mas a reorganização consistente da estrutura de parasitismo em função da proteção física das drupas.

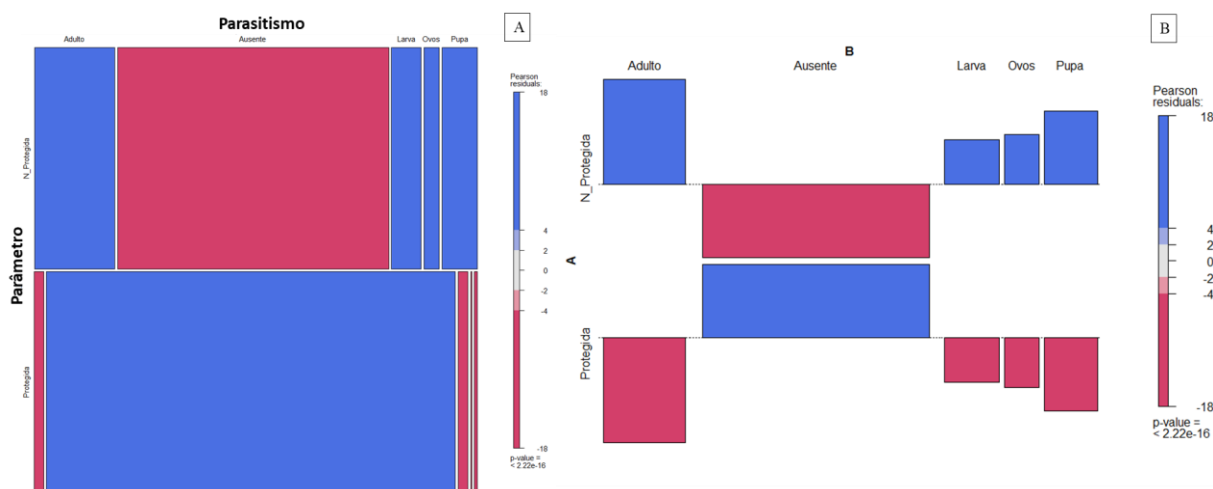


Figura 10 - Associação entre os tratamentos (P-TNT e NP) e as categorias de parasitismo (ovos, larvas, pupa, (e ausente) de *M. transvaalensis* em drupas de *S. terebinthifolia*. A - Mosaico com

áreas proporcionais às frequências observadas. B - Associação de resíduos padronizados destacando as categorias que mais contribuíram para associação observada. A área retangular é proporcional a frequência observada para cada categoria. As cores definem resíduos padronizados de Pearson, onde a cor azul indica frequências observadas maiores que as esperadas sob independência. Cor vermelha indica frequências menores que as esperadas.

A associação entre tratamento e fases do ciclo de vida de *M. transvaalensis* foi verificada no período de estudo (30 DAT: $\chi^2 = 269,68$; gl = 4; $p < 2,2 \times 10^{-16}$; V = 0,33 (Figura 11 A); 60 DAT: $\chi^2 = 121,97$; gl = 4; $p < 2,2 \times 10^{-16}$; V = 0,22 (Figura 11 B); 90 DAT: $\chi^2 = 394,18$; gl = 4; $p < 2,2 \times 10^{-16}$; V = 0,40 (Figura 11 C); e 120 DAT: $\chi^2 = 374,21$; gl = 4; $p < 2,2 \times 10^{-16}$; V = 0,39 (Figura 11 D). A magnitude da associação foi moderada nos períodos iniciais, com redução temporária aos 60 DAT (Figura 11 B), seguida de aumento expressivo aos 90 e 120 DAT (Figura 11 C e D), indicando intensificação do efeito entre os tratamentos ao longo do tempo. Aos 90 e 120 DAT foi possível observar redução das fases imaturas do ciclo de vida do parasitoide e adultos no tratamento protegido (P-TNT), enquanto no tratamento não protegido (NP) ocorrência de todas as fases do ciclo de vida do parasitoide foi verificada (Figura 12). Esses resultados indicam que a proteção com agrotêxtil não apenas reduz a taxa de parasitismo, mas também limita o estabelecimento e a progressão do ciclo de vida de *M. transvaalensis* nas drupas de *S. terebinthifolia*.

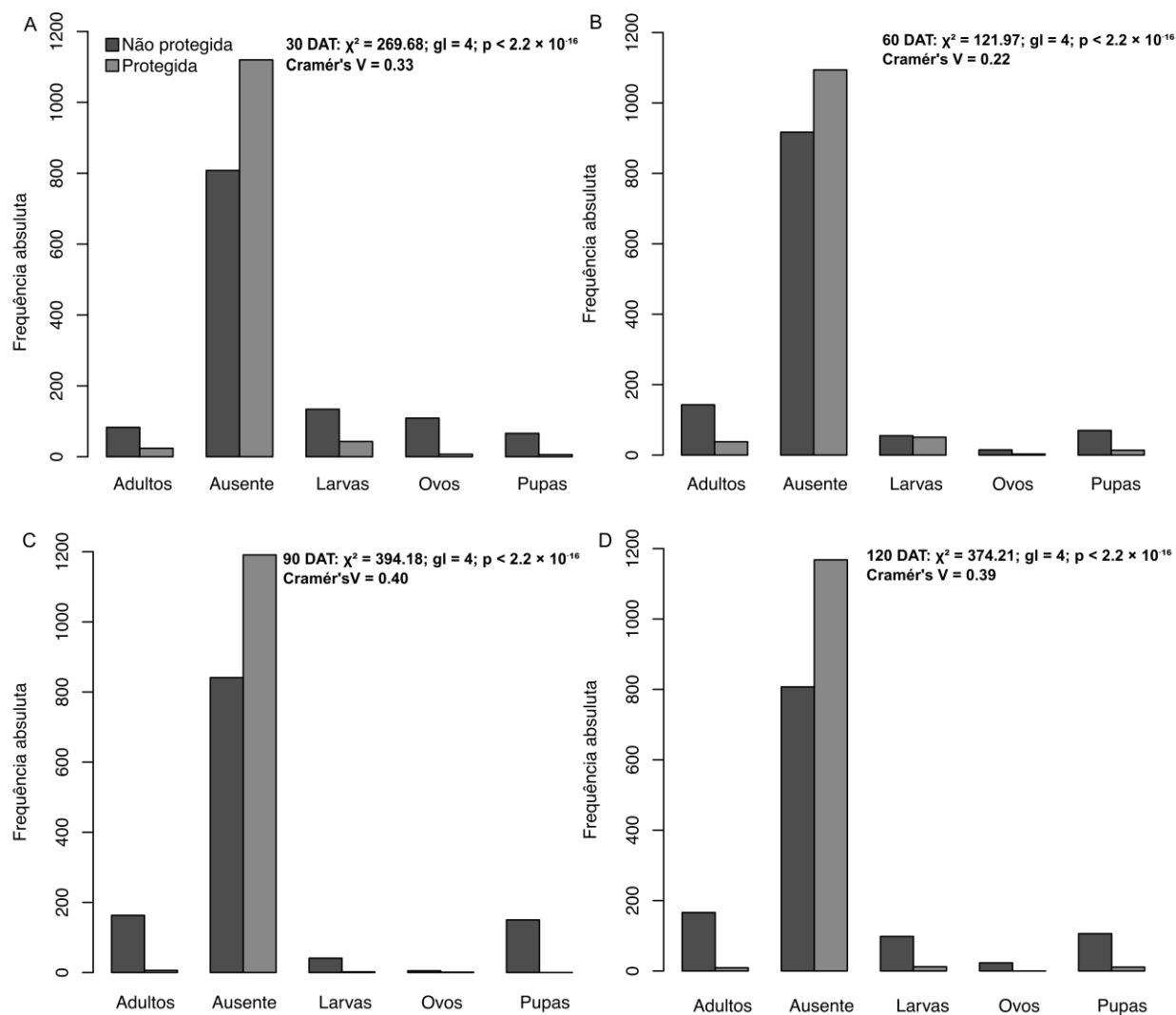


Figura 11 - Frequência absoluta das categorias de parasitismo em drupas de *S. terebinthifolia* em função do período de estudo. (A) 30 DAT ($\chi^2 = 269,68$; gl = 4; $p < 2,2 \times 10^{-16}$; V de Cramér = 0,33); (B) 60 DAT ($\chi^2 = 121,97$; gl = 4; $p < 2,2 \times 10^{-16}$; V de Cramér = 0,22); (C) 90 DAT ($\chi^2 = 394,18$; gl = 4; $p < 2,0 \times 10^{-16}$; V de Cramér = 0,40); e (D) 120 DAT ($\chi^2 = 374,21$; gl = 4; $p < 2,2 \times 10^{-16}$; V de Cramér = 0,39). Associações significativas entre tratamento e categorias de parasitismo foram detectadas pelo teste do qui-quadrado de Pearson em todos os períodos avaliados.

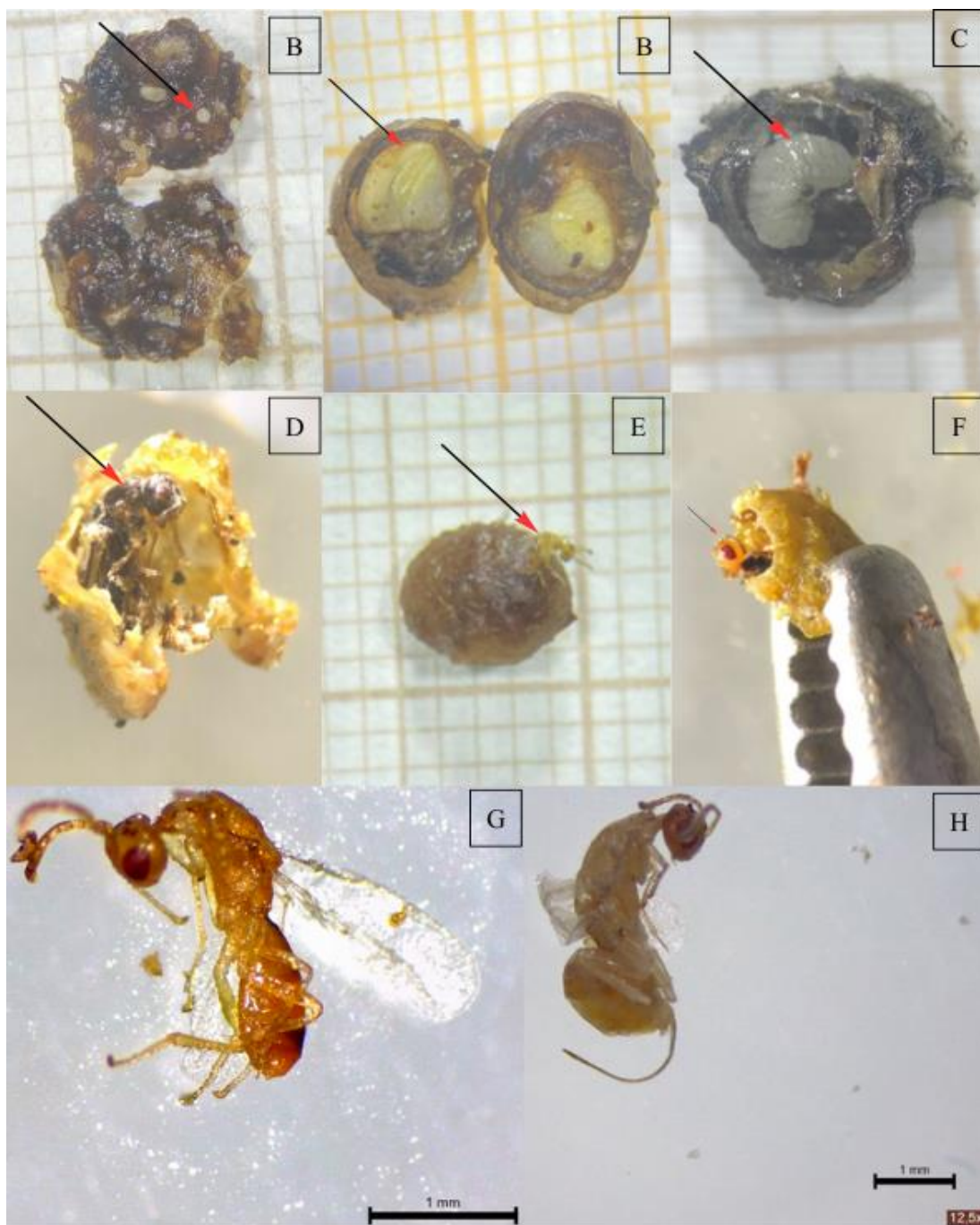


Figura 12 - Ciclo de vida e parasitismo de *M. transvaalensis* em drupas de *S. terebinthifolia*. A – Ovo de *M. transvaalensis* depositado em drupa de *S. terebinthifolia*. B - Larva de *M. transvaalensis* em drupa de *S. terebinthifolia*; C - Pupa de *M. transvaalensis* em drupa de *S. terebinthifolia*; D – Adulto de *M. transvaalensis* em drupa de *S. terebinthifolia*. E e F- Adultos de *M. transvaalensis* emergindo do mesocarpo de *S. terebinthifolia*. G - Vista lateral do macho de *M. transvaalensis*. H - Visão lateral da fêmea de *M. transvaalensis* (12,5x).

O teste de flutuabilidade apresentou alta sensibilidade (97,3%), indicando que a grande maioria das drupas de *S. terebinthifolia* parasitadas foi corretamente classificada como flutuante. Entretanto, a especificidade foi baixa (3,5%), evidenciando que o método apresenta capacidade limitada de identificar corretamente drupas não parasitadas, resultando em elevado número de falsos positivos (Tabela 3), o que indica que fatores fisiológicos além do parasitismo, tenham influenciado na flutuabilidade das drupas, limitando o uso dessa técnica como diagnóstico exclusivo. Esse padrão foi refletido no valor preditivo positivo (21,3%), que indicou que, entre as drupas que flutuaram apenas pequena proporção estava efetivamente parasitada. Por outro lado, o valor preditivo negativo foi alto (82,9%), sugerindo que drupas submersas tendem a estar não parasitadas, embora o número desses casos submersos tenha sido reduzido.

A acurácia global (23,4%) e balanceada (50,4%) indicam desempenho próximo ao esperado por classificação aleatória, com o F1-score (35,0%) reforçando a limitação do teste como ferramenta diagnóstica isolada (Tabela 3). Considerando a prevalência de parasitismo na amostra (21,2%), os resultados indicaram que o teste de flutuabilidade apresentou baixa utilidade prática para separar drupas parasitadas das não parasitadas, por não conseguir reduzir falsos positivos.

Tabela 3 - Indicadores de eficiência diagnóstica do método de flutuabilidade aplicado a drupas de *S. terebinthifolia*.

Parâmetros	%	Classificação
Sensibilidade	97,3	Muito alta
Especificidade	3,5	Muito baixa
Preditivo positivo	21,3	Baixa
Preditivo negativo	82,9	Alta
Acurácia global	23,4	Baixa
Acurácia balanceada	50,4	Limitada
F1 - score	35	Baixa

Diferença marcante no parasitismo foi observada dentro das 16 unidades amostrais dentro dos tratamentos não protegido (NP) e protegido (P-TNT). No tratamento não protegido (NP) a taxa de parasitismo variou de 39,33 à 82% com maior parte de árvores de *S. terebinthifolia*

apresentando valores acima de 50,46%. Valor de parasitismo máximo (82%) foi observado na árvore 7 (Figura 13). Em contrapartida, as plantas de *S. terebinthifolia* grupo submetidas ao tratamento protegido (P-TNT) apresentaram baixa taxa de parasitismo, variando de 1,67 á 20,33%, evidenciando a eficiência da barreira física para no controle de *M. transvaalensis* em cultivo de *S. terebinthifolia* no campo, com valor aproximadamente quatro vezes menor em comparação com as condições naturais (Figura 13).

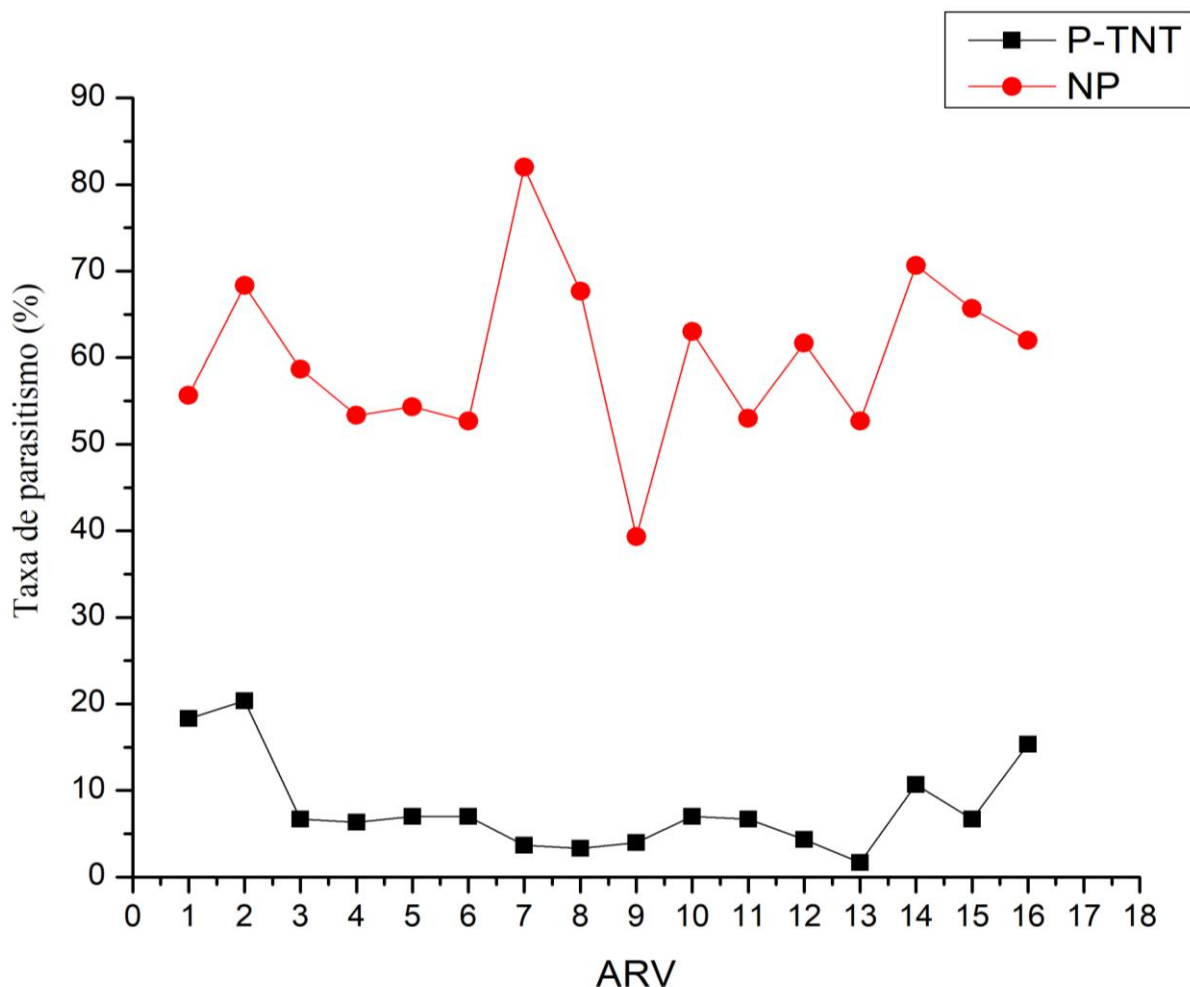


Figura 13 - Taxa de parasitismo (%) de *M. transvaalensis* nas unidades amostrais (ARV – árvores de *S. terebinthifolia*) ao longo do período de estudo entre o tratamento não protegido (NP) e protegido (P-TNT).

O tratamento não protegido (NP) manteve taxa de parasitismo superior ao protegido (P-TNT) em todo período de estudo. A maior diferença foi observada aos 120 DAT, com NP de

67,42%, enquanto P-TNT com 4,67% (Material suplementar). (Figura 14, Material Suplementar).

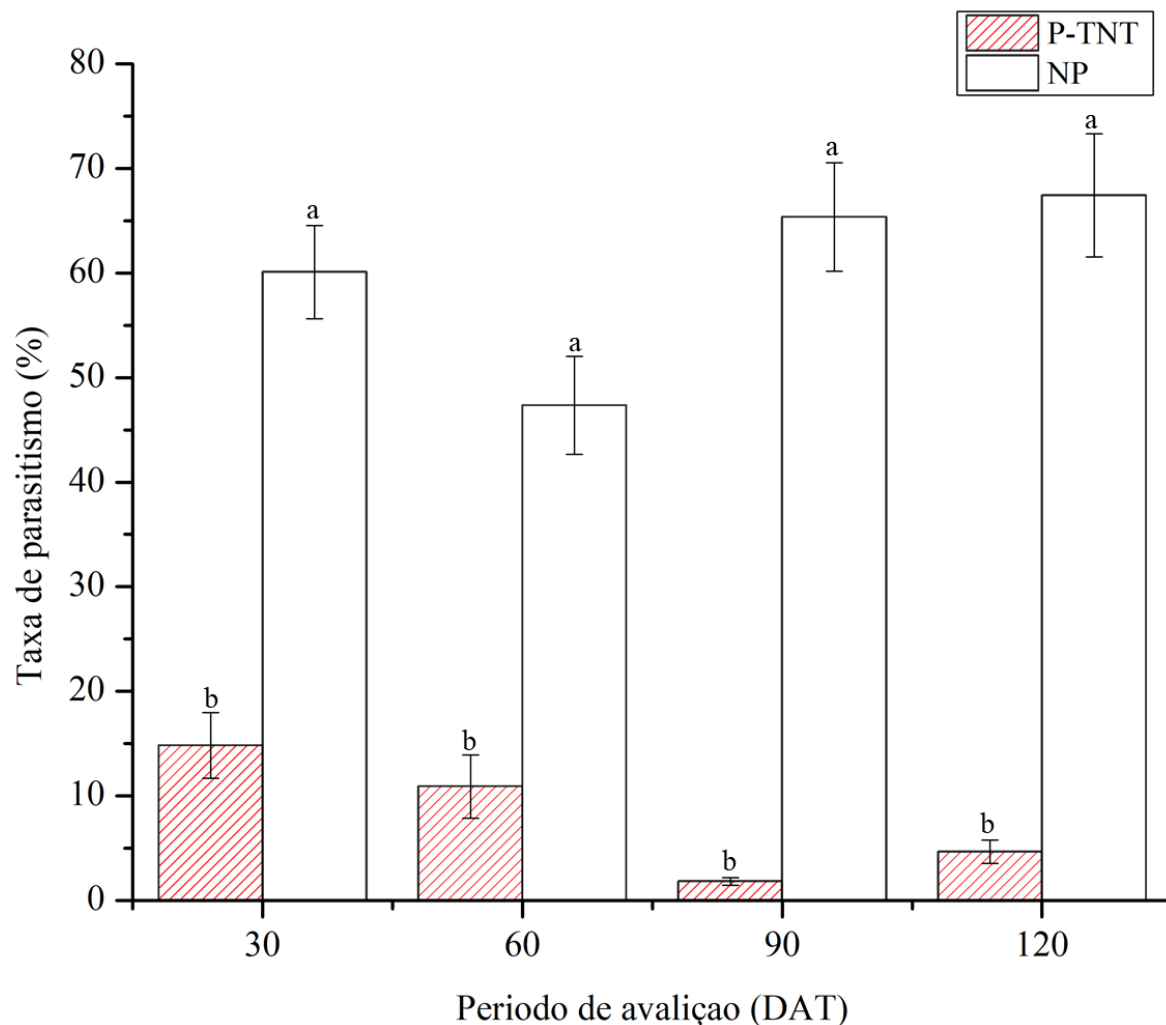


Figura 14 - Taxa de parasitismo médio global ao longo do período de estudo (DAT). P-TNT (30 DAT: $14,83 \pm 12,76$; 60 DAT: $10,92 \pm 12,12$; 90 DAT: $1,88 \pm 1,45$; e 120 DAT: $4,67 \pm 4,46$). NP (30 DAT: $60,8 \pm 17,83$; 60 DAT: $47,33 \pm 18,17$; 90 DAT: $65,33 \pm 20,72$; e 120 DAT: $67,42 \pm 23,60$). Letras minúsculas a e b, indicam diferenças estatísticas entre os tratamentos em relação as médias, onde $a > b$, ($t = -19,26$; $p < 0,001$).

Adicionalmente, a análise de dispersão dos dados mostrou que o tratamento protegido (P-TNT) não apenas reduziu a média de parasitismo, mas também apresentou convergência estatística (Material suplementar). O teste não paramétrico de Wilcoxon revelou diferença entre

os tratamentos ($W=136$. $p < 0,001$). O tratamento protegido (P-TNT) apresentou baixas médias de parasitismo baixas, enquanto que o não protegido (NP) mostrou médias significativamente superiores (Figura 15; Tabela 4). Estes resultados confirmam a hipótese que a barreira física reduz a infestação por *M. transvaalensis*, mesmo em indivíduos que apresentam elevadas taxas de parasitismo natural em condições de campo. O tratamento não protegido (NP) apresentou uma infestação média de 60,45%, aproximadamente 7,5 vezes superior em relação ao observado no tratamento protegido (P-TNT) (8,06%) (Tabela 4).

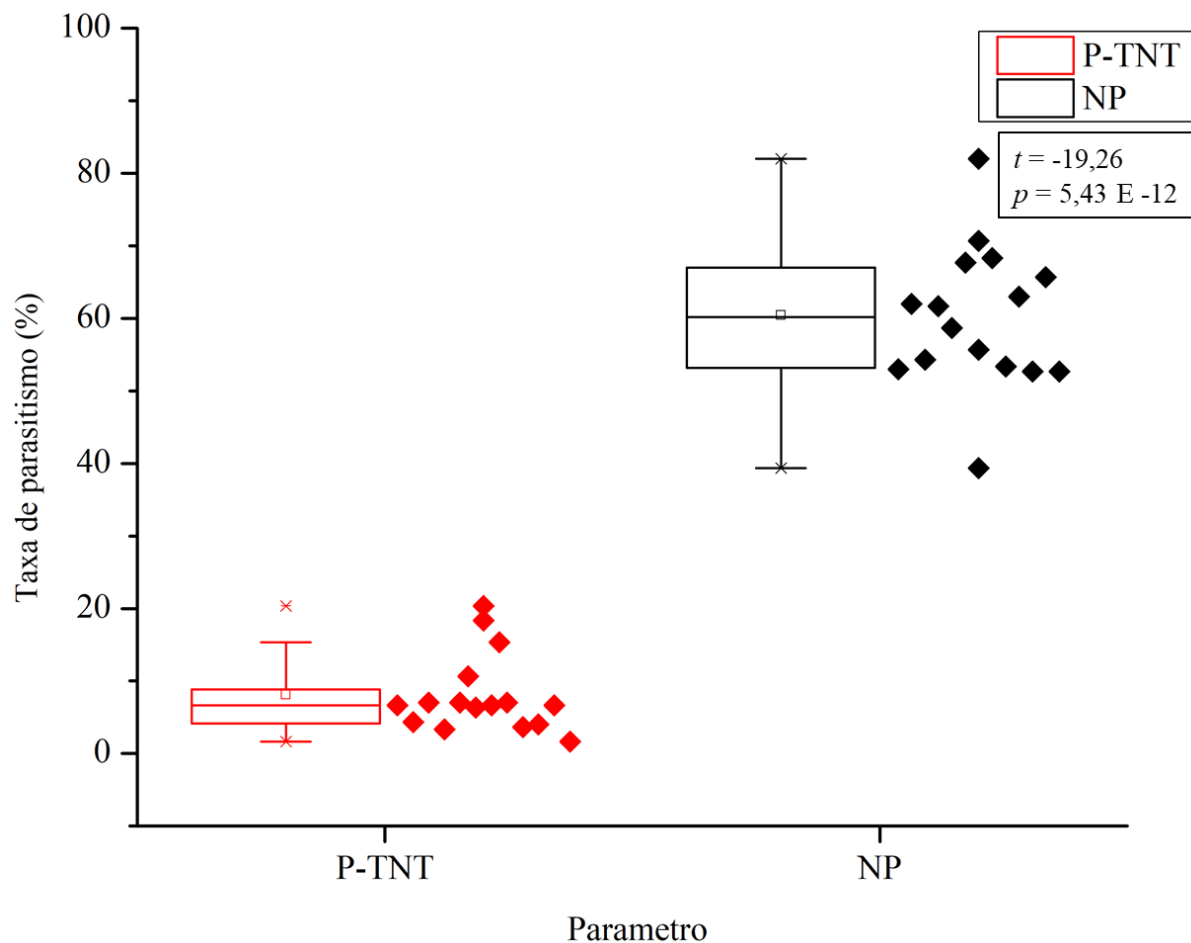


Figura 15 - Taxa de parasitismo (%) por *M. transvaalensis* em drupas de *S. terebinthifolia* protegidas com agrotexil (P-TNT) e sem proteção (NP). Médias seguidas de asteriscos (*) indicam diferenças significativas pelo teste de Wilcoxon ($p < ,001$).

Tabela 4 - Média e parâmetros estatísticos do parasitismo por *M. transvaalensis* em drupas de *S. terebinthifolia*.

Tratamento	$\bar{x} \pm SD$	Ep
P -TNT (%)	8,0625 $\pm$ 5,42179	1,35545
NP (%)	60,45833 $\pm$ 10,18414	2,54603
Diferença absoluta	51,98	-

Nota: P-TNT (%): Tratamento protegido, NP (%): Tratamento não protegido, SD: desvio padrão; Ep: Erro padrão da média; W = 136; P < 0,001.

3.3.4. Efeito do parasitismo por *Megastigmus transvaalensis* e da barreira física na sanidade do embrião de drupas de *Schinus terebinthifolia*

A sanidade do embrião das drupas de *S. terebinthifolia* variou entre os tratamentos dentro do conjunto total de unidades avaliadas, com o tratamento não protegido (NP) mostrando predominância de embriões danificados (83,1%), enquanto no tratamento protegido (P-TNT) padrão inverso foi observado, com predominância de embriões não danificados (80,3%). Essa diferença ($\chi^2 = 3856,3$; gl = 1; $p < 2,2 \times 10^{-16}$), confirmada com teste G ($G = 4172,5$; $p < 0,001$), indica forte dependência entre proteção física e sanidade do embrião. O tamanho do efeito foi elevado (V de Cramér = 0,63), caracterizando associação forte entre as variáveis. A estimativa do *odds ratio* indicou que drupas protegidas apresentaram aproximadamente 20 vezes mais chance de possuir embriões não danificados em relação às sementes não protegidas (OR = 20,0; IC95%: 18,0–22,2) (Tabela 5).

Tabela 5 - Distribuição da sanidade do embrião de *S. terebinthifolia* em função dos tratamentos).

Tratamento	Danificado		Não Danificado		%Total
	N	%	N	%	
NP	3989	83,1	811	16,9	100
P-TNT	947	19,7	3853	80,3	100
N Total	4936	-	4664	-	9600

Nota: N: número de drupas de *S. terebinthifolia* avaliadas. P-TNT: Tratamento Protegido; NP: Não protegida.

A visualização por *mosaic plot* confirmou esse padrão (Figura 16). Excesso de drupas danificadas no tratamento NP e de sementes não danificadas no P-TNT foi observado, enquanto as combinações opostas apresentaram frequências inferiores às esperadas sob hipótese de independência (Figura 16A). A magnitude dos resíduos padronizados de Pearson indicou que

essas células contribuíram para associação observada, evidenciando forte separação entre os tratamentos (Figura 16B).

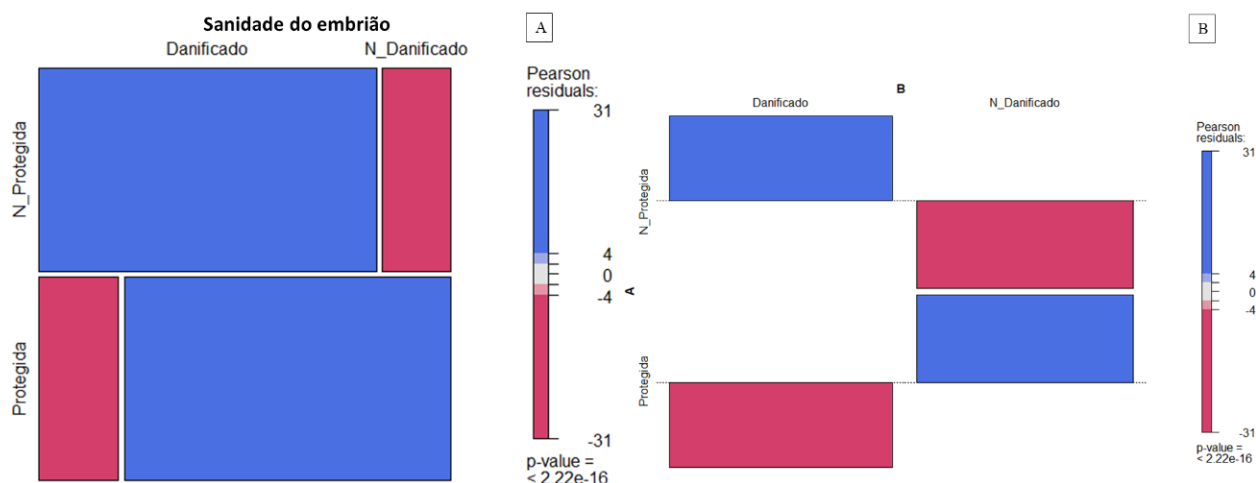


Figura 16 - Associação entre os tratamentos (NP e P-TNT) e sanidade do embrião (Danificado e não danificado). (A) Mosaic plot com áreas proporcionais às frequências observadas. (B) Resíduos padronizados de Pearson. Células em azul indicam frequências observadas maiores que as esperadas sob independência, enquanto células em vermelho indicam frequências menores que as esperadas. A intensidade da cor representa a magnitude do desvio. O teste do qui-quadrado indicou associação significativa entre as variáveis ($P < 2,2 \times 10^{-16}$).

A diferença entre os tratamentos foi consistente e mantida ao longo de todo período de estudo ($p < 0,001$). Aos 30 DAT (Figura 17 A), 87% das drupas do tratamento não protegido NP apresentaram embriões danificados, contra 28% no tratamento não protegido P-TNT ($\chi^2 = 852,3$; $V = 0,60$). Aos 60 DAT (Figura 17 B), o padrão permaneceu semelhante, com 81,3% de danos em NP e 24,2% em P-TNT ($\chi^2 = 782,1$; $V = 0,57$). Aos 90 DAT (Figura 17 C) maior divergência entre os tratamentos foi observada, com 76,5% de embriões danificados em NP e apenas 9,2% em P-TNT ($\chi^2 = 1108,2$; $V = 0,68$), indicando intensificação do efeito protetor da barreira física TNT. Esse padrão se manteve até os 120 DAT (Figura 17 D), quando 87,7% das drupas do tratamento NP apresentaram danos embrionários, contra 17,6% no tratamento P-TNT ($\chi^2 = 1179,3$; $V = 0,70$). O tratamento protegido com TNT reduziu a incidência de danos embrionários em todo o período estudado, demonstrando efeito protetor robusto e persistente da barreira física sobre a sanidade das drupas de *S. terebinthifolia* no campo.

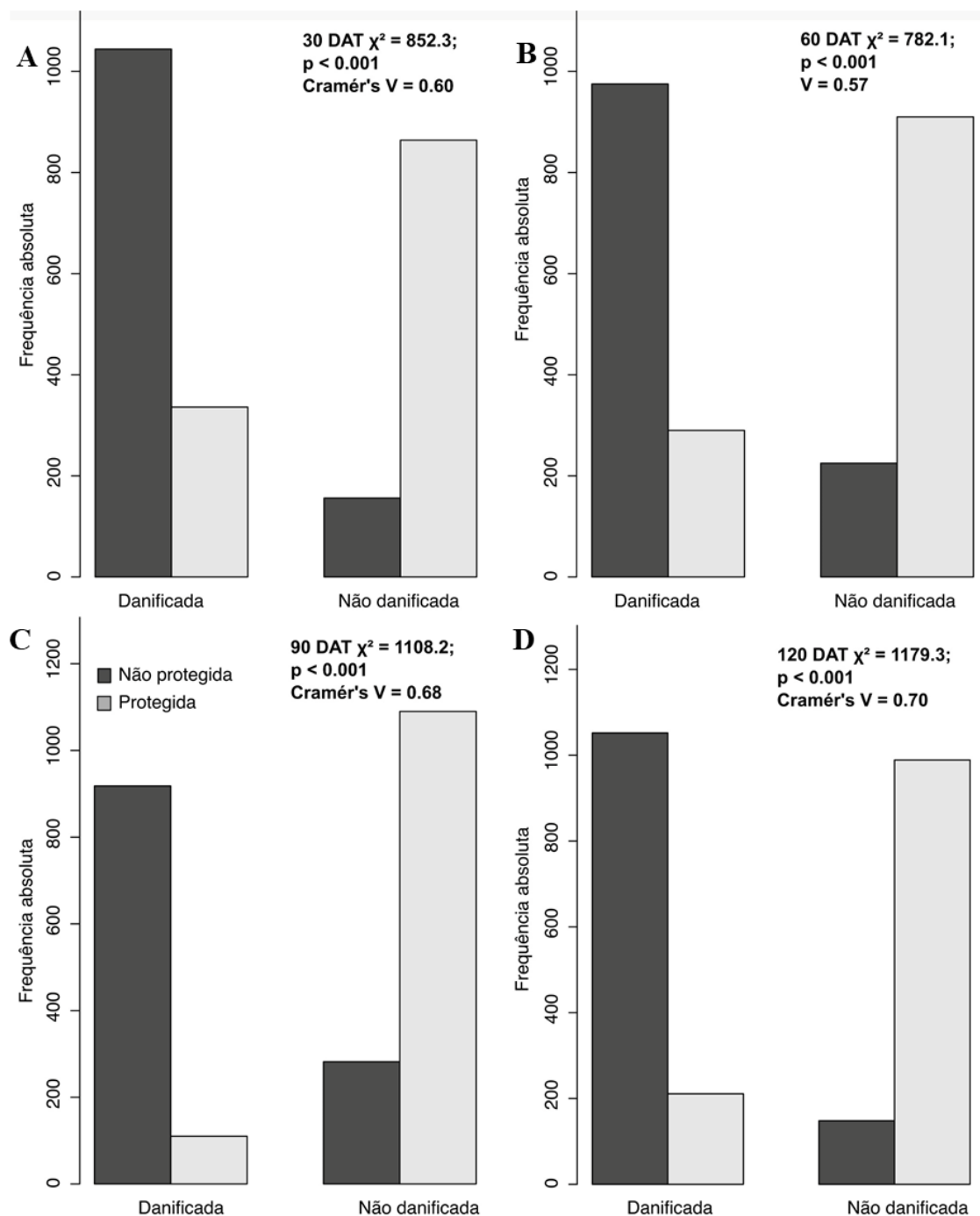


Figura 17 - Sanidade do embrião de drupas de *S. terebinthifolia* em função do tratamento (Não protegida NP e protegida P-TNT) ao longo do período de estudo. DAT - dias após tratamento. (A) 30, (B) 60, (C) 90 e (D) 120 DAT. Barras representam frequências absolutas. (Qui-quadrado, $p < 0,001$).

3.4. DISCUSSÃO

3.4.1. Influência dos tratamentos sobre a flutuabilidade das drupas de *Schinus terebinthifolia*

Diferenças estatísticas entre o estado de proteção das drupas de *S. terebinthifolia* e os resultados obtidos pelo teste de flutuabilidade, indicaram que a distribuição entre flutuação e submersão não ocorreu de forma independente entre os tratamentos avaliados P-TNT e NP, respectivamente. O efeito inicial da proteção com TNT sobre a submersão indicou uma possível influência temporária na integridade das drupas de *S. terebinthifolia* analisadas, provavelmente ligada à interação inicial com água. A redução progressiva dessa diferença ao longo do tempo mostrou que o efeito não se mantém, indicando um ajuste gradual das condições físicas entre os tratamentos, o que resulta em padrões semelhantes de flutuação nas etapas finais de experimento

O aumento gradual do efeito ao longo dos dias após tratamento, indicou que a ausência da proteção favorece o acúmulo de alterações externas à medida que o desenvolvimento avança, assim como a maturação da drupa. A maturação das drupas também contribuiu para a variação na flutuabilidade, com drupas imaturas, por apresentar maior volume de ar e tecidos menos densos, com tendência de flutuar, enquanto drupas maduras, mais densas, passam a submergir (Guerreiro & Paoli, 1999; Totti & Medeiros, 2006).

O aumento dos números de drupas flutuantes ao longo do tempo de estudo, ocorreu mesmo sem sinais de parasitismo por *M. transvaalensis* evidente. A ausência danos morfológicos severos, isto é, danos aparentes na estrutura vegetativa derivados do parasitismo, não exclui a redução da aptidão reprodutiva da planta, o que indica um redimensionamento energético que pode acarretar potenciais consequências para a dinâmica de toda a comunidade vegetal (Sánchez-Ordóñez et al. 2025). Por outro lado, durante o processo de desidratação, pode ocorrer redução significativa nas proporções de glicose e frutose (Freire et al. 2024), o que também pode contribuir para a flutuação de drupas ou sementes quando imersas em água. Drupas vazias, na sua maioria deterioradas ou danificadas por insetos podem apresentar menos densidade e tenderem a flutuar (Daneshvar et al. 2017). O avanço no desenvolvimento das drupas resultou em maior flutuabilidade e redução da fração submersa. Embora a ausência de medições fisiológicas diretas impeça a identificação de processos causais específicos, é possível que mudanças naturais ao longo da maturação da drupa estejam associadas à dinâmica do

comportamento observado. Além disso, a flutuabilidade possui implicações ecológicas, pois sementes menos densas são favorecidas em processos de dispersão hídrica, sendo influenciada por características estruturais do propágulo assim como pelo peso e volume (Lopez, 2001). Embora *S. terebinthifolia* seja predominantemente zoocoria (Carvalho, 2014), estudos demonstraram que seus frutos podem permanecer flutuantes por vários dias, possibilitando dispersão por rios e ecossistemas costeiros (Tassin et al. 2007; Donnelly & Walters, 2008). Isso pode explicar a predominância de drupas flutuantes ao longo de todo o período de estudo, independente do tratamento (P-TNT vs. NP). Enquanto que a submersão das drupas, pode estar relacionada com a maior viabilidade, demonstrando maior capacidade germinativa após a imersão prolongada (Lopez, 2001),

Observou-se um número maior de drupas protegidas (P-TNT) submersas em relação ao grupo não protegido (NP); entretanto, essa diferença não foi estatisticamente significativa ($p > 0,05$). Ainda assim, essas drupas protegidas com agrotêxtil TNT mostraram cerca de 2,8 vezes mais chances de submergir que as não protegidas, indicando efeito biológico relevante da proteção na manutenção da integridade dos frutos, possivelmente por reduzir estresses externos ou danos iniciais que poderiam afetar a densidade. Estudos mostraram que a proteção com agrotêxtil TNT tem efeitos consistentes na produtividade e na qualidade de frutos, pois estes são justificados pelas diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos aplicados (Dantas et al. 2013; Santos et al. 2015; Rocha et al. 2024). Enquanto em NP, observou-se incrementos numéricos em parâmetro de drupas contendo cicatriz e orifício de 90DAT para 120DAT, contudo tais variações não apresentaram significância estatística.

Essa ocorrência de tendências biológicas sem suporte estatístico, e deve ser interpretada com cautela podendo estar associada à alta variabilidade intrínseca dos dados e do tamanho amostral (Da Silva carmo et al. 2023; Rocha et al. 2024). A ausência de significância estatística não anula a relevância biológica do fenômeno, mas indica que a magnitude do efeito não foi suficiente para rejeitar a hipótese nula.

Estudos indicaram que as características estruturais das drupas podem influenciar o comportamento de flutuação, o que limita a precisão deste método quando utilizado isoladamente. Desta forma, neste estudo, a flutuabilidade foi associada a etapas adicionais de verificação da sanidade do epicarpo e dessecação das sementes (Moore, 1972; Fenner &

Thompson, 2005). No entanto, embora testes de germinação sejam citados na literatura como complementares para avaliar a viabilidade fisiológica, estes não integraram os objetivos desta pesquisa, que focou na correlação entre os atributos físicos e o parasitismo.

3.4.2. Influência dos tratamentos sobre sinais de dano no epicarpo de *Schinus terebinthifolia*

A detecção precoce de sinais de ataque de *M. transvaalensis* em drupas de *S. terebinthifolia* foi limitada, principalmente nos primeiros estágios de desenvolvimento das drupas (aos 30 DAT), que nesta fase são imaturas, e raramente é possível observar no epicarpo catrizes (necrose) ou orifício de emergência de adultos de *M. transvaalensis* (perfuração) (Ghiotto et al. 2019; Wilkomm et al. 2024). Esses sinais tornaram-se perceptíveis a partir de 60 DAT, após a queda dos botões florais com drupas bem desenvolvidas e início da maturação, podendo em alguns casos, acontecer antes do período relatado. Portanto, esse padrão observado sobretudo em drupas não protegida (NP), reflete o desenvolvimento do inseto e a reduzida expressão externa do parasitismo em estágios iniciais. Nessa fase inicial de desenvolvimento (de 30 a 60 DAT), a vespa ainda não completou seu ciclo de vida, dificultando a detecção de danos (Cuda et al. 2002; González & Pereira, 2013; Roques et al. 2016; Jansen-González et al. 2020a), havendo a necessidade de utilização de técnicas de detecção precoce e não invasivos, como marcadores moleculares ou técnicas de imagem (Siqueira et al. 2021).

O número de drupas de *S. terebinthifolia* sem sinais de ataque nas plantas com proteção confirmou a eficiência da barreira física, evidenciada pela diferença significativa existente entre os tratamentos, conforme verificado no cultivo de maçã ensacada com agrotêxtil TNT, que mostrou redução dos danos como, distúrbios fisiológicos e alteração nos teores de cálcio, os quais podem causar necrose nos frutos (Teixeira et al. 2011). A ocorrência de danos em drupas protegidas pode estar relacionada a instalação tardia da manta agrotêxtil e das condições ambientais. Portanto, fatores como temperatura elevadas e alta incidência solar não apenas otimizam o desenvolvimento fenológico de *S. terebinthifolia*, assim como também potencializam a atratividade de *M. transvaalensis*, favorecendo o ataque do inseto (Spector & Putz, 2006; Roques et al. 2016; Jansen-González 2020; Martins et al. 2021, Filazzola et al. 2021; Magengelele & Martin, 2023; Wilkomm, et al. 2024).

3.4.3 Influência dos tratamentos no parasitismo e ciclo de vida de *Megastigmus transvaalensis*

A acurácia diagnóstica do teste de flutuabilidade mostrou uma alta sensibilidade e baixa especificidade, evidenciando que o método identifica que a maioria de drupas de *S. terebinthifolia* estavam parasitadas, mas demonstrou falhas em discriminar drupas sadias (grande número de falsos positivos). O valor preditivo negativo elevado (82%), indica que drupas de *S. terebinthifolia* submetidas a este teste e que submergiram são geralmente não parasitadas. Esse achado, reforça que o teste é adequado como uma triagem preliminar, mas não como diagnóstico isolado, sendo necessária a confirmação usando outros testes, como a dissecação ou métodos morfológicos mais precisos (Villiers et al. 1994; Thapa et al. 2023). A avaliação de teste diagnóstico em parasitologia com matriz de confusão, sensibilidade, especificidade e medidas de acurácia é padrão em estudos que comparam métodos de detecção de parasitas em estudos com flutuação, sendo importante quando existe desequilíbrio entre os grupos amostrais (Ballweber et al. 2014; Abdu et al. 2022; Elghryani et al. 2025).

A taxa de parasitismo por *M. transvaalensis* foi maior nas drupas de *S. terebinthifolia* não protegidas (60,04%), com presença de todas as fases do ciclo de vida dessa vespa observada, enquanto o tratamento protegido com manta agrotêxtil TNT apresentou taxa de parasitismo menor (8,06%), corroborando com as hipóteses iniciais. Estudos anteriores na região de Sorocaba em São Paulo-Brasil, obtiveram valores correspondentes a taxa de parasitismos que variaram de 36 a 55% (Ferreira-Filho et al. 2015; Ghiotto et al. 2019). Em contraste, no México foram observadas taxas expressivas de infestação de *Schinus molle* por *M. transvaalensis* (42,4%), enquanto nas cidades de Puebla e Morelos a infestação variou de 4 a 63%, tendo sido constatado que apenas 5% das drupas encontravam-se parasitadas em uma das amostras de Puebla (Lomeli-Flores et al. 2025). Em outros países, como África do Sul, danos médios em *S. terebinthifolia* ficam perto de 20-22% com uma máxima observada de 80% (Magengelele & Martin, 2023).

A estabilidade das taxas de parasitismo no tratamento protegido ao longo do período de estudo mostrou ação efetiva da manta agrotêxtil TNT na redução da oviposição de *M. transvaalensis* no campo e predominância de ovos e larvas nas primeiras semanas e de pupas e adultos nas etapas finais correspondentes ao ciclo biológico da *M. transvaalensis* na estação de

julho e agosto (fase inicial) e setembro e outubro (fase final) foi evidenciado, corroborando com descrições anteriores (Grissell & Prinsloo, 2001; Wheeler et al. 2001; Cuda et al. 2006; Roques et al. 2016). Esses resultados podem ser atribuídos a fatores, como disponibilidade de recursos, pouca resistência do hospedeiro e condições ambientais favoráveis (Ghiotto et al. 2019; Marchiori, 2023).

A reduzida taxa de parasitismo por *M. transvaalensis* observada no tratamento protegido das drupas de *S. terebinthifolia*, mostra a eficácia da barreira física na proteção das drupas contra o ataque do inseto praga, como verificado no cultivo de melão, e tomate, protegidos com manta agrotêxtil com redução da incidência de pragas, melhorando a qualidade de frutos (Leite et al. 2014; Da Silva Carmo et al. 2023). Estudos similares também comprovaram que o ensacamento de frutos (exemplo de maçã e banana) e vegetais (tomates) com TNT prolongaram a vida útil das frutas evitando o amolecimento, descoloração, perda de peso (Riahi et al. 2022), aumento da produtividade (Leite & Fialho, 2017), e a qualidade comercial dos frutos (Sohag et al. 2023; K et al. 2024. Deepti et al. 2025).

Importante ressaltar o fato de que o tratamento protegido (P-TNT) se manteve constante com taxas mínimas de infestação até o final do ciclo de maturação (4,66%), e isso comprova a durabilidade e resistência do material (TNT) em condições de campo, por impedir o parasitismo tardio e garantir a viabilidade das drupas dessa planta. Essa durabilidade em condições de campo destaca a robustez dos TNT frente aos desafios ambientais e pode garantir proteção por períodos prolongados (Restrepo-Osorio et al. 2019). Em consonância com este estudo, que mostraram controle quase total de pragas e doenças em frutos ensacados com TNT ou outros não tecidos (Leite et al. 2014; Sharma et al. 2020).

A robustez dos resultados confirmados pelo teste de Wilcoxon ($p < 0,001$), consolida o agrotêxtil TNT como estratégia de manejo altamente eficiente, comprovada pela redução da média de parasitismo no campo. Estes resultados indicam ainda que esse material pode fornecer proteção (até 120 dias) e limitar a infestação por pragas garantido o desenvolvimento dos frutos ao longo do ciclo de maturação. Estudos com proteção de sementes de espécies florestais nativas são escassos, havendo a necessidade de mais pesquisas devido ao papel que este material pode significar dentro das estratégias de manejo sustentável de pragas (Abd-Elgawad, 2021, Fernández-Aparicio et al. 2020). Contudo, é importante salientar sobre a correta utilização do

agrotêxtil em campo, pois é sabido que as interações entre insetos e sementes são reconhecidas como fator importante na ecologia das plantas, devido a predação ou dispersão que podem diminuir a produção de sementes viáveis e influenciar o processo de regeneração natural das plantas (Fenner & Thompson, 2005; Baskin & Baskin, 2014).

3.4.5. Influência dos tratamentos na sanidade do embrião das drupas de *Schinus terebinthifolia*

Avaliação da sanidade embrionária das drupas de *S. terebinthifolia* confirmou o impacto direto do parasitismo no tratamento não protegido, que apresentaram maior frequência de embriões necrosados e escurecidos, consistente com a atividade alimentar das larvas de *M. transvaalensis*. No entanto, nas drupas protegidas dessa planta, os embriões se mantiveram inteiros, evidenciando que a proteção reduz significativamente danos no interior da semente. Embora, o parasitismo comprometa a viabilidade das sementes, no tratamento protegido a produção de drupas de *S. terebinthifolia* viáveis foi alta, característica que contribui para seu estabelecimento no campo (Panetta & McKee, 1997; Tassin et al. 2007; Donnelly & Walters, 2008).

A utilização da manta agrotêxtil TNT mostrou alta eficiência na proteção das drupas de *S. terebinthifolia* reduzindo danos no epicarpo, parasitismo e deterioração embrionária, sem comprometer sua maturação em campo, dessa forma a utilização dessa técnica, amplamente utilizada na agricultura (Grangeiro et al. 2005, Medeiros et al. 2007; Dantas et al. 2013; Scarlet et al. 2017; Manna et al. 2018; Marasović & Kopitar, 2019; Guedri et al. 2022; Carmo et al. 2023; Brunsek et al. 2023; Dragumilo et al. 2023; Deepti et al. 2025), pode apresentar-se como promissora no manejo de *M. transvaalensis* no cultivo de *S. terebinthifolia* no Brasil e em países que cultivam essa planta para produção de frutos.

Contudo, o correto momento de aplicação do TNT, é crucial para garantir sua máxima eficiência, especificamente devido a sincronização entre o desenvolvimento das drupas de *S. terebinthifolia* e o período de oviposição da vespa exótica *M. transvaalensis*. A emergência e o pico de voo de *M. transvaalensis* coincidem com as fases de floração e formação de frutos de *S. terebinthifolia*, e, período este quando as drupas estão suscetíveis ao parasitismo, o que reforça a necessidade de posicionar a proteção antes ou no início desta fase crítica (Ghiotto et al. 2019). Este ajuste é importante para proteger o órgão-alvo justamente na fase mais vulnerável (Williams

et al. 2019) e, adicionalmente, a remoção tardia da proteção também pode comprometer a qualidade dos frutos (Carmo et al. 2023; Willkomm et al. 2024).

3.5. CONCLUSÃO

Considerando os objetivos propostos para este capítulo, referentes á avaliação de barreira física e á taxa de parasitismo por *M. transvaalensis* em drupas de *S. terebinthifolia* permitiram as seguintes conclusões:

- O teste de flutuabilidade mostrou-se ineficaz para o diagnóstico isolado de parasitismo em *S. terebinthifolia*, apresentando uma baixa especificidade do método que resultou em um elevado índice de falsos positivos;
- O uso da manta agrotêxtil TNT como barreira física reduziu significativamente o parasitismo por *M. transvaalensis*, limitando a infestação a 8,06% em comparação aos 60,04% observados em drupas não protegidas.
- A manta TNT, além de combater danos estéticos no epicarpo da drupa através da exclusão física de *M. transvaalensis*, preservou a integridade embrionária.
- O método de exclusão física consolida-se como uma estratégia sustentável para conservar a qualidade das drupas de *S. terebinthifolia* em campo.

3.6. REFERÊNCIAS

- Abd-Elgawad, M. M. M. (2021). Optimizing safe approaches for managing plant-parasitic nematodes. *Plants*, 10(9), 1911. <https://doi.org/10.3390/plants10091911>
- Abdu, S., Chimento, M., Alarcón-Nieto, G., Zúñiga, D., Aplin, L. M., Farine, D. R., & Brandl, H. B. (2022). O desempenho da amostragem de campo para detecção de parasitas em um passeriforme selvagem. *Ecology and Evolution*, 12(8), e9242. <https://doi.org/10.1002/ece3.9242>
- Abreu, M. C., Cecílio, R. A., Pruski, F. F., Santos, G. R. D., Almeida, L. T. D., & Zanetti, S. S. (2018). Critérios para escolha de distribuições de probabilidades em estudos de eventos extremos de precipitação. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 33, 601–613. <https://doi.org/10.1590/0102-7786334004>
- Al-Sammarraie, MAJ, Gokalp, Z. & Aziz, SA. Análise da eficácia de tratamentos naturais para a conservação de damascos e a aplicação do YOLOv7 para a detecção de pragas. <https://doi.org/10.1007/s44187-025-00445-z>
- Alves, M. K., & Oliveira, N. S. B. (2018). Barreiras físicas no controle de pragas e vetores em unidades de alimentação e nutrição de Caxias do Sul, RS. *Higiene Alimentar*, 32(286–287), 33–37. [https://www.bvs-vet.org.br/vetindex/periodicos/higiene-alimentar/32-\(2018\)-286-287/barreiras-fisicas-no-controle-de-pragas-e-vetores-em-unidades-de-alime/](https://www.bvs-vet.org.br/vetindex/periodicos/higiene-alimentar/32-(2018)-286-287/barreiras-fisicas-no-controle-de-pragas-e-vetores-em-unidades-de-alime/)
- Andriola, W. B. (2001). Descrição dos principais métodos para detectar o funcionamento diferencial dos itens (DIF). *Psicologia: Reflexão e Crítica*, 14(3), 643–652. <https://doi.org/10.1590/S0102-79722001000300020>
- Araújo, M. F., Camara, C. A., Moraes, M. M., & Born, F. S. (2020). Insecticidal properties and chemical composition of *Piper aduncum* L., *Lippia sidoides* Cham. and *Schinus terebinthifolius* Raddi essential oils against *Plutella xylostella* L. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 92(suppl 1), e20180895. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202020180895>
- Balla, A., et al. (2021). The threat of pests and pathogens and the potential for biological control in forest ecosystems. *Forests*, 12(11), 1579. <https://doi.org/10.3390/forests12111579>

- Ballweber, L. R., Beugnet, F., Marchiondo, A. A., & Payne, P. A. (2014). Revisão da Associação Americana de Parasitologistas Veterinários sobre métodos de flutuação fecal veterinária e fatores que influenciam sua precisão e uso - existe realmente uma técnica melhor? *Veterinary Parasitology*, 204(1-2), 73–80. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2014.05.009>
- Baskin, C. C.; Baskin, J. M. (2014). *Seeds: ecology, biogeography, and evolution of dormancy and germination*. Academic Press.
- Beckage, N. E., & Gelman, D. B. (2004). Wasp parasitoid disruption of host development: Implications for new biologically based strategies for insect control. *Annual Review of Entomology*, 49(1), 299–330. <https://doi.org/10.1146/annurev.ento.49.061802.123324>
- Bernardi, J., Ferreira, J., Puton, B. M., Camargo, S. C., Magro, J. D., Junges, A., Cansian, R. L., Steffens, C., Zeni, J., & Paroul, N. (2024). Potential agrochemical applications of *Schinus terebinthifolius* essential oil. *Journal of Stored Products Research*, 106, 102260. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2024.102260>
- Bolboacă, S. D., Jäntschi, L., Sestraș, A. F., Sestraș, R. E., & Pamfil, D. C. (2011). Pearson-Fisher Chi-Square statistics revisited. *Information*, 2(3), 528–545. <https://doi.org/10.3390/info2030528>
- Brasil. (2009). *Regras para análise de sementes*. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. MAPA/ACS.
- Brunsek, R., Jugov, N., Marasovic, P., & Mioč, A. (2023). Biodegradation properties of natural fibers for agro textile nonwovens production. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1266(1), 012017. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1266/1/012017>
- Canavan, K., Magengelele, N. L., Paterson, I. D., Williams, D. A., & Martin, G. D. (2022). Uncovering the phylogeography of *Schinus terebinthifolia* in South Africa to guide biological control. *AoB PLANTS*, 14(1). <https://doi.org/10.1093/aobpla/plab078>
- Carmello-Guerreiro, S. M., & Paoli, A. A. S (1999). Morfologia e anatomia da semente de *Schinus terebinthifolius* Raddi (Anacardiaceae) em desenvolvimento. *Revista Brasileira de Botânica*, 22(1), 91–98. <https://doi.org/10.1590/S0100-84041999000100012>

- Carmo, I. L. G. S., et al. (2023). Melon management using agrotextile and plasticulture and its prospects for Roraima. *Contribuciones a las Ciencias Sociales*, 16(12), 32521–32536. <https://doi.org/10.55905/revconv.16n.12-206>
- Carvalho, M. G., et al. (2013). *Schinus terebinthifolius* Raddi: Chemical composition, biological properties and toxicity. *Revista Brasileira de Plantas Medicinai*s, 15(1), 158–169. <https://doi.org/10.1590/S1516-05722013000100022>
- Cenobio-Galindo, A. J., Hernández-Fuentes, A. D., González-Lemus, U., Zaldívar-Ortega, A., González-Montiel, L., Madariaga-Navarrete, A., & Hernández-Soto, I. (2024). Plant extract-based biofungicides: On the way to organic agriculture. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(13), 6879. <https://doi.org/10.3390/ijms25136879>
- Climate-Data.org. (2021). *Clima Sorocaba: temperatura, gráfico climático, tabela climática Sorocaba*. <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/sao-paulo/sorocaba-3843/>
- Costa, P. F., Silva, J. B., Oliveira, M. R., & Santos, A. L. (2022). Regeneração natural em três áreas de restauração florestal no Mato Grosso do Sul, Brasil. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 42, Artigo e2088. <https://doi.org/10.4336/2022.pfb.v42.2088>
- Couto, I. F., Silva, S. S., Valente, F. M., Araújo, B. B., De Souza, S. A., Mauad, M., Scalón, S. P., & Mussury, R. M. (2019). Botanical extracts of the Brazilian Cerrado affect the feeding and oviposition of *Plutella xylostella* (Linnaeus, 1758) (Lepidoptera: Plutellidae). *Journal of Agricultural Science*, 11(5), 322. <https://doi.org/10.5539/jas.v11n5p322>
- Cuda, J. P., Wheeler, G. S., & Habeck, D. H. (2002). *Brazilian peppertree seed wasp, Megastigmus transvaalensis* (Hymenoptera: Torymidae). University of Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, EDIS.
- Cuda, J. P.; Ferriter, A. P.; Manrique, V.; Medal, J. C. (2006). Biology and management of Brazilian peppertree (*Schinus terebinthifolia*). *Critical Reviews in Plant Sciences*, 25.
- Da Silva Carmo, I., De Medeiros, R. D., De Anchieta Alves De Albuquerque, J., Alvarez, R. C. F., Da Silva, D. L., De Sousa, N. J. A., & Ribeiro, P. R. S. (2023). Manejo do melão utilizando agrotêxtil e plasticultura e suas perspectivas para Roraima. *Contribuições para as Ciências Sociais*, 16(12), 29606–29623. <https://doi.org/10.55905/revconv.16n.12-206>

- Daneshvar, A., Tigabu, M., Karimidoost, A. *et al.* . Flotation techniques to improve viability of seed lots. *Journal of Forestry Research.. J. For. Res.* **28** , 231–239 (2017). <https://doi.org/10.1007/s11676-016-0306-2>
- Dantas, M. S. M., et al.(2013). Rendimento e qualidade de melancia cultivada sob proteção de agrotêxtil combinado com mulching plástico. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 17, 824–829. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000800004>
- De Souza, E. M. S., et al (2022). *Schinus terebinthifolia* Raddi: A comparative framework on population genetic structure in a restored area after 12 years. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 69(7), 2459–2467. <https://doi.org/10.1007/s10722-022-01384-9>
- De Souza, E. V., Andrade, G. C., Araújo, H. H., & Dias-Pereira, J. (2022). Structural plasticity in leaves of *Schinus terebinthifolius* (Anacardiaceae) populations from three contrasting tropical ecosystems. *The Journal of the Torrey Botanical Society*, 149(3). <https://doi.org/10.3159/TORREY-D-22-00001.1>
- Deepti, A., Kala, S., & Prakash, P. (2025). Sacos não tecidos: uma cobertura ecológica para cachos em vez de sacos plásticos para produção de banana de alta qualidade. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 53, 780–793. <https://doi.org/10.1080/01140671.2025.2473709>
- Donnelly, M. J., & Walters, L. J. (2008). Water table depth and reproductive output of the invasive Brazilian pepper *Schinus terebinthifolius* in South Florida. *Florida Scientist*, 71(2), 138-147.
- Dragumilo, A., Marković, T., Vrbničanin, S., Prijić, Ž., Mrđan, S., Radanović, D., & Božić, D. (2023). Weed suppression by mulches in *Mentha x piperita* L. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 35, 100499. <https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2023.100499>
- Elghryani, N., McAloon, C. G., Lahan, G., McOwan, T., & De Waal, T. (2025). Comparando o desempenho do OvaCyte e das técnicas tradicionais na detecção de parasitas gastrointestinais caninos. *Parasites & Vectors*, 18(1), 1–12. <https://doi.org/10.1186/s13071-025-06935-4>
- Fenner, M.; Thompson, K. (2005). *The Ecology of Seeds*. Cambridge University Press.

- Fernandes, D. R. R., et al (2014). *Megastigmus transvaalensis* (Hymenoptera: Torymidae) on *Schinus polygamus* (Anacardiaceae): A new native host for this invasive seed-feeding species. *Idesia* (Arica), 32(4), 119–122. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292014000400016>
- Fernández-Aparicio, M., Delavault, P., & Timko, M. P. (2020). Manejo da infecção por ervas daninhas parasitas: uma revisão. *Plants*, 9(9), Artigo 1184. <https://doi.org/10.3390/plants9091184>
- Ferreira-Filho, P. J., et al (2015). The exotic wasp *Megastigmus transvaalensis* (Hymenoptera: Torymidae): First record and damage on the Brazilian peppertree, *Schinus terebinthifolius* drupes, in São Paulo, Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 87(4), 2091–2095. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201520140478>
- Filazzola, A., Matter, S. F., & MacIvor, J. S. (2021). The direct and indirect effects of extreme climate events on insects. *Science of The Total Environment*, 769, 145161. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145161>
- Foschi, M. L., Juan, M., Pascual, B., & Pascual-Seva, N. (2022). The Imbibition, Viability, and Germination of Caper Seeds (*Capparis spinosa* L.) in the First Year of Storage. *Plants*, 11(2), 202. <https://doi.org/10.3390/plants11020202>
- Freire, J. M., et al. (2024). Drying and storage of *Piptadenia gonoacantha* (Mart.) J.F. Macbr. seeds. *Brazilian Journal of Biology*, 84. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.286382>
- G. M., Unlu, I., Rochlin, I., Wang, Y., & Gaugler, R. (2019). Momento ideal para tratamentos de barreira com lambda-cialotrina e piriproxifeno para o manejo de *Aedes albopictus* (Diptera: Culicidae). *Journal of Economic Entomology*, 112(3), 1337–1342. <https://doi.org/10.1093/jee/toz020>
- Ghiotto, T. C., et al. (2019). *Megastigmus* seed wasp damage on native *Schinus terebinthifolia* drupes in ecological restoration area in Brazil. *Scientific Reports*, 9(1), 2438. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-39129-x>
- GOMES, Damião Junior et al. Uso medicinal da *Schinus terebinthifolius* Raddi (Anacardiaceae): uma revisão de literatura. *Revista de Agroecologia no Semiárido*, [S. l.], v. 6, n. 4, p. 31–40,

2022. Disponível em: <https://periodicos.ifpb.edu.br/index.php/ras/article/view/6767>. Acesso em: 7 out. 2025.
- Grangeiro, L. C., Barros Júnior, A. P., Bezerra Neto, F., Negreiros, M. Z., Souza, J. O., & Azevedo, P. E. (2005). Cultivo de rúcula em túneis baixos de tecido não-tecido. *Científica*, 33(2), 218–221. <https://doi.org/10.15361/1984-5529.2005v33n2p218-221>
- Grissell, E. E., & Prinsloo, G. L. (2001). Seed-feeding species of *Megastigmus* (Hymenoptera: Torymidae) associated with Anacardiaceae. *Journal of Hymenoptera Research*, 10(2), 271–291.
- Guedri, W., Jaoudi, M., & Msahli, S. (2022). Evaluating farmer's satisfaction of different agrotexile bunch covers using desirability function. *Textile Research Journal*, 92(17–18), 3337–3350. <https://doi.org/10.1177/00405175211006945>
- Gurvich, V., & Naumova, M. (2025). Critical issues with the Pearson's chi-square test. *arXiv preprint*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2505.06318>
- Hight, S. D., et al. (2003). Biology, host specificity tests, and risk assessment of the sawfly *Heteroperreya hubrichi*, a potential biological control agent of *Schinus terebinthifolius* in Hawaii. *BioControl*, 48(4), 461–476. <https://doi.org/10.1023/A:1024734508842>
- Jansen-González, S., Teixeira, S. P., & Pereira, R. A. S. (2020). Larval strategy of two species of seed-feeding Chalcidoidea parallels that of parasitoid koinobionts. *Oecologia Australis*, 24(4), 903–916. <https://doi.org/10.4257/OECO.2020.2404.13>
- K., S., Tank, R. V., Bhat, D., Teli, I., & Tandel, B. M. (2024). Efeito do ensacamento de frutas no desenvolvimento e qualidade da goiaba. *Agriculture Association of Textile Chemical and Critical Reviews*. <https://doi.org/10.21276/aatccreview.2024.12.02.108>
- Khramov, R., et al (2022). Luminescence of agrotexiles based on red-light-emitting organic luminophore and polypropylene spunbond enhances the growth and photosynthesis of vegetable plants. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.827679>
- Koga, M. L., Peralta, D. F., & Magrin, A. G. E. (2022). Briófitas do remanescente florestal do Campus da Universidade Federal de São Carlos, Município de Sorocaba, Estado de São Paulo, Brasil. *Hoehnea*, 49, e422021. <https://doi.org/10.1590/2236-8906-42/2021>

Köppen, W., & Geiger, R. (1948). *Klimakarte der Erde*. Justus Perthes

Lavrenov, M., Kotov, A., & Alyab'ev, A. (2025). Melhorando o método de flotação de sementes no exemplo do lariço siberiano (*Larix sibirica* Ledeb.). *Forestry Engineering Journal*, 14(3), 7. <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.3/7>

Leite, G. L. D., & Fialho, A. (2017). Proteção de tomates usando tecnologia de ensacamento e seu papel no MIP de pragas artrópodes. In: *Sustainable Management of Arthropod Pests of Tomato* (pp. 305–311). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-802441-6.00014-0>

Leite, G. L. D., Fialho, A., Zanuncio, J. C., Júnior, R. S., & Costa, C. A. (2014). Ensacamento de frutos de tomate: um método viável e econômico de prevenção de doenças e danos por insetos na produção orgânica. *Florida Entomologist*, 97 (1), 50–60. <https://doi.org/10.1653/024.097.0106>

Lomeli-Flores, J. R., Contreras-Ortíz, C., Rodríguez-Leyva, E., & Valdez-Carrasco, J. (2025). New distribution records of *Megastigmus transvaalensis* in Mexico and data on its infestation in *Schinus molle*. *Southwestern Entomologist*, 50(2), 536–542. <https://doi.org/10.3958/059.050.0212>

Lopez, O.(2001). Seed flotation and postflooding germination in tropical terra firme and seasonally flooded forest species. *Functional Ecology*, 15, 763–771. <https://doi.org/10.1046/j.0269-8463.2001.00586.x>

Magengelele, N., & Martin, G. (2023). Distribution and impact of the native South African wasp, *Megastigmus transvaalensis* (Hussey, 1956) (Hymenoptera: Torymidae) on the invasive *Schinus terebinthifolia* Raddi (Anacardiaceae) in South Africa. *African Entomology*, 31, Artigo a13583. <https://doi.org/10.17159/2254-8854/2023/a13583>

Malone, C. R. (1967). A rapid method for enumeration of viable seeds in soil. *Weeds*, 15(4), 381–382. <https://doi.org/10.2307/4041016>

Manna, K., Kundu, M. C., Saha, B., & Ghosh, G. K. (2018). Effect of nonwoven jute agrotexile mulch on soil health and productivity of broccoli (*Brassica oleracea* L.) in lateritic soil. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(2), 82. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6452-y>

- Marchiori, Carlos Henrique. 2023. “Studies of the Families Cleonymidae, Coelocybidae, Epichrysomallidae, Eunotidae, Heydeniidae, Megastigmidae, Neanastatidae, Pirenidae, Spalangiidae and Systasidae (Hymenoptera: Chalcidoidea).” *Open Access Research Journal of Science and Technology* 8(1):014–031. doi: [10.53022/oarjst.2023.8.1.0027](https://doi.org/10.53022/oarjst.2023.8.1.0027).
- Martins, C. F., Santos Junior, W. A. C., Silva, L. de S., & de Paula, J. R. (2021). *Schinus terebinthifolius* Raddi: scientometric analysis. *Research, Society and Development*, 10(8), e11110817016. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i8.17016>
- Melo, G. A. R., & Dal Molin, A. (2024). Hymenoptera Linnaeus, 1758. In *Insetos do Brasil: Diversidade e Taxonomia* (2ª ed., cap. 27).
- Miller, K. E., Polaszek, A., & Evans, D. M (2021). A dearth of data: fitting parasitoids into ecological networks. *Trends in Parasitology*, 37(10), 863–874. <https://doi.org/10.1016/j.pt.2021.04.012>
- Moore, R. P. (1972). *Tetrazolium Testing Handbook*. Association of Official Seed Analysts.
- Ngegba, P. M., Cui, G., Khalid, M. Z., & Zhong, G. (2022). Use of botanical pesticides in agriculture as an alternative to synthetic pesticides. *Agriculture*, 12(5), 600. <https://doi.org/10.3390/agriculture12050600>
- O'Callaghan, M., et al. (2021). Otimizando abordagens seguras para o manejo de nematoides parasitas de plantas. *Plants*, 10(9), Artigo 1911. <https://doi.org/10.3390/plants10091911> (Nota: Ajustei o autor principal que estava faltando no seu texto original).
- Panetta, F. D., and J. McKee. 1997. “Recruitment of the invasive ornamental, *Schinus Terebinthifolius*, is dependent upon frugivores.” *Australian Journal of Ecology* 22(4):432–38. doi: [10.1111/j.1442-9993.1997.tb00694.x](https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.1997.tb00694.x).
- Ponce, F. S., et al. (2021). Low tunnels with shading meshes: an alternative for the management of insect pests in kale cultivation. *Scientia Horticulturae*, 288, 110284. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110284>
- Restrepo-Osorio, A., Álvarez-López, C., Jaramillo-Quiceno, N., & Fernández-Morales, P. (2019). Agrotêxteis e têxteis para proteção de cultivos. In: *High Performance Technical Textiles* (Cap. 10). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119325062.ch10>

- Riahi, Z., Ezati, P., Rhim, J. W., Bagheri, R., & Pircheraghi, G. (2022). Filmes antimicrobianos de captura de etileno à base de nanofibras de celulose incorporados com vários tipos de nanopartículas de dióxido de titânio para prolongar a vida útil de frutas. *ACS Applied Polymer Materials*, 4(7), 4814–4825. <https://doi.org/10.1021/acsapm.2c00338>
- Rocha, R. H. C., Da Silva Ponce, F., Toledo, C. A. B., Júnior, J. L. S., Da Silva Campos, R., Diamante, M. S., Grangeiro, L. C., Krause, W., & Júnior, S. S. S. (2024). O cultivo do melão sob agrotêxtil aumenta a produção e reduz os produtos fitossanitários. *Comunicata Scientiae*, 15, e4093. <https://doi.org/10.14295/cs.v15.4093>
- Roques, A., et al. (2016). *Megastigmus* seed chalcids (Hymenoptera, Torymidae) radiated much more on angiosperms than previously considered. I-Description of 8 new species from Kenya. *ZooKeys*, 585, 51–124. <https://doi.org/10.3897/zookeys.585.7503>
- Ruxton, GD, & Neuhäuser, M. (2013). Revisão de abordagens alternativas para o cálculo de um intervalo de confiança para a razão de chances de uma tabela de contingência 2× 2. *Métodos em Ecologia e Evolução*, 4 (1), 9-13. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210x.2012.00250.x>
- Santos, F. G. B., Negreiros, M. Z., Medeiros, J. F., Nunes, G. H. S., De Medeiros, D. C., & Grangeiro, L. C. (2015). Produção e qualidade de melão Cantaloupe em cultivo protegido temporariamente com agrotêxtil em Mossoró, Rio Grande do Norte. *Revista Ceres*, 62(1), 93–100. <https://doi.org/10.1590/0034-737x201562010012>
- Scarlat, R., Pricop, F., & Rusu, L. (2017). Knitted agrotextiles for a sustainable agriculture. *Industria Textila*, 68(5), 332–336. <https://doi.org/10.35530/IT.068.05.1413>
- Scheffer, S. J., & Grissell, E. E. (2003). Tracing the geographical origin of *Megastigmus transvaalensis* (Hymenoptera: Torymidae): an African wasp feeding on a South American plant in North America. *Molecular Ecology*, 12(2), 415–421. <https://doi.org/10.1046/j.1365-294X.2003.01725.x>
- Sharma, R. R., Nagaraja, A., Goswami, A. K., Thakre, M., Kumar, R., & Varghese, E. (2020). Influência do ensacamento de frutos na árvore sobre os estresses bióticos e a qualidade pós-colheita da safra de goiaba 'Allahabad Safeda' (*Psidium guajava* L.) na estação chuvosa. *Crop Protection*, 135, 105216. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105216>

- Silva, A. L., & Silva, E. N. (2012). Análise higrotérmica do campo e da cidade durante a passagem de um sistema frontal no período de inverno, Sorocaba, SP. *Revista Geonorte*, 3(9), 123–134. <https://www.researchgate.net/publication/306034347>
- Silva, P. S., Camaroti, J. B., Almeida, W. R., Ferreira, E. G., Paiva, P. M., Barros, R., Napoleão, T. H., & Pontual, E. V. (2019). *Schinus terebinthifolia* leaf extract is a larvicidal, pupicidal and oviposition deterrent agent against *Plutella xylostella*. *South African Journal of Botany*, 127, 124-128. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.08.054>
- Soares, J. J., Nascimento, A. R. B., Silva Filho, J. L., & Silva, M. V. (2011). População de artrópodes benéficos em algodoeiro afetado por inseticidas em sistemas de manejo integrado e convencional. *Arquivos do Instituto Biológico*, 78(1), 147–150. <https://doi.org/10.1590/1808-1657v78p1472011>
- Sohg, M. S. H., Rahman, M. M., Kayess, M. O., & Ifty, M. S. I. (2023). Efeito do ensacamento pré-colheita de frutos no rendimento, qualidade pós-colheita e vida útil do tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cv. BARI Tomato-2. *Journal of Applied and Natural Science*, 15(1), 227–234. <https://doi.org/10.31018/jans.v15i1.4261>
- Souza, J. G., Jahnke, S. M., & Sant'Ana, J. (2025). Effect of *Eucalyptus citriodora* and *Schinus terebinthifolius* essential oils on the diamondback moth and its parasitoid *Trichogramma pretiosum*. *Journal of Plant Protection Research*, 65. <https://doi.org/10.24425/jppr.2025.155787>
- Spector, T., & Putz, F. E. (2006). Biomechanical plasticity facilitates invasion of maritime forests in the southern USA by Brazilian pepper *Schinus terebinthifolius*. *Biological Invasions*, 8(2), 255–260. <https://doi.org/10.1007/s10530-004-5571-x>
- Tassin, J., Riviere, J. N., & Josselin, N. (2007). Propagule pressure and distribution of the invasive tree *Schinus terebinthifolius* on Réunion Island, Indian Ocean. *South African Journal of Botany*, 73(1), 162-165. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2006.07.004>
- Teixeira, R., et al. (2011). Efeito do ensacamento dos frutos no controle de pragas e doenças e na qualidade e maturação de maçãs 'Fuji Suprema'. *Bragantia*, 70, 688–695. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052011000300027>

- Tinoco, T. J., Silva, P. L., & Rocha, A. P. S. (2023). Manejo integrado de pragas e doenças em sistemas agrícolas. *Revista Contemporânea*, 3(11), 22675–22697. <https://ojs.revistacontemporanea.com/ojs/index.php/home/article/view/2233>
- Tkachenko, K. (2022). Controle de qualidade de frutos e sementes de plantas medicinais. *Boletim Farmacêutico Macedônio*, 66(04), 019. <https://doi.org/10.33320/maced.pharm.bull.2020.66.04.019>
- Wheeler, G. S., Massey, L. M., & Endries, M.(2001). The Brazilian peppertree drupe feeder *Megastigmus transvaalensis* (Hymenoptera: Torymidae): Florida distribution and impact. *Biological Control*, 22(2), 139–148. <https://doi.org/10.1006/bcon.2001.0968Williams>,
- Willkomm, V. E., Ramos, D. D., Zarate, N. A. H., & Vieira, M. C. (2024). Cultivation of pink pepper in succession to cover crops and bokashi application. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 28(7), e278539. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v28n7e278539>
- Xia, Y., et al. (2019). Recent advances in emerging techniques for non-destructive detection of seed viability: A review. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 1, 35–47. <https://doi.org/10.1016/j.aiia.2019.05.001>
- Zhang, Y., Tian, X., Wang, H., Casteñé, C., Arnó, J., Collatz, J., Romeis, J., Wu, S., Xian, X., Liu, W., Wan, F., & Zhang, G. (2022). Host selection behavior of the host-feeding parasitoid *Necremnus tutae* on *Tuta absoluta*. *Entomologia Generalis*, 42(3), 445–456. <https://doi.org/10.1127/entomologia/2021/1246>
- Zhou, W., et al. (2024). Integrated pest management: an update on the sustainability approach to crop protection. *ACS Omega*, 9(40), 41130–41147. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c04514>

CAPITULO II - Cinética de secagem de drupas de *Schinus terebinthifolia* (Sapindales: Anacardiaceae)

RESUMO

A fim de estimar com precisão a produtividade de qualquer cultura, e, rendimento é sempre importante expressar os dados em base da matéria seca, e isso depende diretamente de um procedimento de secagem bem conduzida e eficiente. Caso contrário, o rendimento será inflado por água e não por biomassa útil, e as comparações entre tratamentos tornam-se pouco confiáveis para além de negligenciar as perdas reais de qualidade e de produto durante o armazenamento e processamento. O objetivo desse estudo foi determinar a curva de secagem de drupas de *Schinus terebinthifolia* Raddi, 1820 (Sapindales: Anacardiaceae), com ajuste de modelo matemático dos dados experimentais. A pesquisa foi conduzida em área de preservação ecológica no Estado de São Paulo, entre maio e junho de 2024. Nesse período, drupas foram coletadas de plantas (N = 29) que, em sua maioria eram maduros. O Cálculo do teor de umidade das drupas foi realizado, e posterior secagem a temperatura inicial de 105°C por 24h, a fim de determinar o teor de umidade inicial, em seguida, repetido o mesmo procedimento em temperatura de 30°C por 72h, e aferidas as massas dos momentos para todas matrizes. Os dados obtidos foram ajustados a dois modelos matemáticos: exponencial decrescente e hiperbólico. O modelo hiperbólico demonstrou superioridade estatística apresentando indicadores de performance para a predição tanto do teor de umidade ($R^2_{Adj} = 0,979$; AIC = 196,52; RMSE = 0,55; $X^2_{red} = 0,308$), quanto para a redução da massa ($R^2_{Adj} = 0,954$, AIC = 254,50; RMSE = 0,706; $X^2_{red} = 0,507$), superando o modelo exponencial. A cinética de secagem apresentou velocidade máxima inicial de 0,7916%h⁻¹ com uma redução acentuada após 24h (0,1112%h⁻¹), com o ponto assintótico (y = 1,9%), estabeleceu-se o tempo de 48 horas (0,0421%h⁻¹) como ideal para a desidratação das drupas de *S. terebinthifolia*, considerado esse intervalo como momento em que o sistema atinge o equilíbrio higroscópico e cessa a perda significativa de massa.

Palavras-chave: ajuste de modelo, aroeira pimenteira; perda de massa; teor de umidade; velocidade de secagem.

ABSTRACT

To accurately estimate the yield of any crop, it is essential to express data on a dry matter basis, which directly depends on a well-conducted and efficient drying procedure. Otherwise, yield will be inflated by water content rather than useful biomass, making comparisons between treatments unreliable and neglecting actual quality and product losses during storage and processing. This study aimed to determine the drying curve of *Schinus terebinthifolia* Raddi, 1820 (Sapindales: Anacardiaceae) drupes by fitting mathematical models to experimental data. The research was conducted in an ecological preservation area in the State of São Paulo, Brazil, between May and June 2024. During this period, drupes were collected from plants (N = 29), most of which were mature. The moisture content of the drupes was calculated; an initial drying at 105°C for 24h was performed to determine the initial moisture content, followed by the same procedure at 30°C for 72h, with mass measurements recorded at specific intervals for all matrices. The data were fitted to two mathematical models: decreasing exponential and hyperbolic. The hyperbolic model demonstrated statistical superiority, showing higher performance indicators for predicting both moisture content ($R^2_{Adj} = 0,98$; AIC = 196,52; RMSE = 0,55; $X^2_{red} = 0,308$), and mass reduction ($R^2_{Adj} = 0,954$, AIC = 254,50; RMSE = 0,706; $X^2_{red} = 0,507$), outperforming the exponential model. The drying kinetics showed a maximum initial rate of 0,7916%h⁻¹ with a sharp reduction after 24h (0,1112%h⁻¹). Based on the asymptotic point (y = 1.9%), a period of 48 hours (0,0421%h⁻¹) was established as ideal for the dehydration of *S. terebinthifolia* drupes, as this interval represents the moment when the system reaches hygroscopic equilibrium and significant mass loss ceases.

Keywords: model fitting; Brazilian pepper tree; mass loss; moisture content; drying rate.

4.1. INTRODUÇÃO

As sementes são fundamentais para a preservação das espécies vegetais, pois atuam como principal meio de dispersão e continuidade biológica da flora (Cross, Pedrini e Dixon, 2020; Gomes et al. 2023; Rosa et al. 2023). Esses propágulos mantêm a resiliência das espécies nativas, e são responsáveis pela propagação das plantas, que, por sua vez, sustentam insetos e animais nas florestas, garantindo o equilíbrio e a continuidade dos ecossistemas (Wambugu, Nyamongo e Kirwa, 2023; Torok, Valko e Deak, 2024).

Schinus terebinthifolia Raddi, 1820 (Sapindales: Anacardiaceae), comumente conhecida por aroeira e pimenta-rosa (Carvalho, 1994; Hocking et al. 1997; Lenzi & Orth, 2004; Magengelele & Martin, 2023), é uma planta com frutos vermelhos do tipo drupa (Silva et al. 2001; Vitória et al. 2018), com sementes pequenas com cerca de 4 a 5 mm (Panetta & McKee, 1997; Carmello-Guerreiro & Paoli, 1999). As sementes de *S. terebinthifolia* são classificadas como recalcitrantes (alta sensibilidade a desidratação e ao armazenamento a baixas temperaturas), o que faz com que seja um desafio a conservação e propagação dessa planta, especialmente em programas de reflorestamento ou conservação de germoplasma (Oliveira et al. 2018; Marília Shibata et al. 2019). A conservação das sementes recalcitrantes tem sido um dos maiores desafios no campo de recursos genéticos vegetais (Zhang et al. 2023; Gomes & Barbedo, 2024).

A secagem de sementes é uma etapa do processo para preservação da viabilidade e qualidade fisiológica, especialmente em espécies florestais como *S. terebinthifolia* (Siqueira et al. 2012; Governici et al. 2020). Esta etapa é fundamental, pois reduz o teor de água para níveis adequados ao armazenamento, evitando a deterioração causada por microrganismos, respiração acelerada, degradação de compostos essenciais, permitindo a manutenção da qualidade inicial, que são os fatores que comprometem sua capacidade germinativa (Silva et al. 2018; Walters & Pence, 2021). Em sementes de *S. terebinthifolia*, a secagem adequada é especialmente relevante em projetos de restauração florestal, pois garante a longevidade e qualidade durante o armazenamento (Governici et al. 2020).

A modelagem matemática é empregada para compreender e aperfeiçoar o processo de secagem, pois descreve fenômenos como a transferência de calor e massa, além de prever o comportamento das sementes sob diferentes condições (Canal et al. 2025). Essa abordagem

permite determinar as condições ideais de temperatura e umidade para maximizar a eficiência da secagem, reduzir custos e evitar danos às sementes (Keneni et al. 2019). Adicionalmente, facilita o planejamento de estratégias de secagem em larga escala, minimizando a necessidade de experimentos empíricos (Srivastava & Sit, 2024).

No que concerne à *S. terebinthifolia*, a modelagem pode ser utilizada para estimar o ponto de equilíbrio higroscópico das sementes, prever a taxa de secagem e evitar danos térmicos, assegurando a preservação da viabilidade (Canavan et al. 2022). Assim, a aplicação de modelos matemáticos no processo de secagem facilita o desenvolvimento de estratégias mais eficientes e sustentáveis, contribuindo para a conservação da biodiversidade e o sucesso de projetos de restauração florestal (Ferreira Junior et al. 2021; Srivastava & Sit, 2024).

Os modelos comumente utilizados em estudos da cinética de secagem em frutos e sementes, são os de regressão não linear, como o exponencial decrescente, linear logarítmico e o hiperbólico (Anzanello & Fogliatto, 2007; Keneni et al. 2019; Ferreira Junior et al. 2021; Srivastava & Sit, 2024).

Considerando que a redução da massa ao longo do tempo constitui um indicador indireto da perda de água das drupas, a opção foi modelar a cinética de secagem com base na variação percentual da massa, utilizando modelos empíricos amplamente aplicados em estudos de secagem de sementes florestais.

A comparação entre modelos permite não apenas descrever o comportamento temporal do processo, mas também fornecer subsídios para estimativas indiretas de estabilização hídrica e planejamento de manejo pós-colheita e refletem exatamente o que a literatura recente em secagem reporta (Avhad & Marchetti, 2016; Aranha et al. 2022; Gebre et al. 2024).

O objetivo deste estudo foi determinar a cinética de secagem das drupas de *S. terebinthifolia* com avaliando a perda de massa ao longo do tempo e o ajuste de modelos matemáticos, a fim de identificar a equação que melhor descreve o comportamento higroscópico do material sob condições controladas.

4.2. MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1. Coleta de dados

A pesquisa foi conduzida em área de restauração de floresta estacional semidecidual localizada em Sorocaba, São Paulo, Brasil (23°11'09"S; 47°29'30"W). O clima da região é classificado como tropical, com sazonalidade bem definida (according to the Köppen-Geiger classification; Beck et al. 2018).

Vinte nove matrizes de *S. terebinthifolia* distribuídas na área experimental foram aleatoriamente selecionadas. A coleta das drupas ocorreu entre maio e junho de 2024, período correspondente à maturação dos frutos. As panículas foram coletadas manualmente, priorizando-se aquelas com predominância de frutos maduros, conforme critérios visuais descritos na literatura para a espécie (Neves et al. 2018; Bierhals et al. 2020). Os frutos foram beneficiados em relação à integridade e remoção de impurezas.

4.2.2. Determinação do teor de umidade

O teor de umidade (U) inicial foi determinado conforme as Regras para Análise de Sementes (Brasil, 2009; Brasil, 2016). Inicialmente, os recipientes metálicos foram secos em estufa sem circulação de ar por 30 minutos e resfriados em dessecador até temperatura ambiente.

Em seguida, 50 drupas *in natura* em duas repetições, onde foram distribuídas uniformemente no recipiente e mensuradas para obtenção da massa fresca (m_f). As amostras foram então submetidas à secagem em estufa a 105 °C por 24 horas, visando determinar a massa seca (m_s). Passado este período de secagem, as amostras foram retiradas da estufa e transportadas para um dessecador, e após o resfriamento voltou-se novamente a aferir a massa seco (m_s) com ajuda de uma balança analítica previamente calibrada.

Registou-se os valores correspondentes as massas obtidas, e calculou-se o teor de umidade inicial para cada matriz coletada (Carlos et al. 2006; Brasil, 2009; Do Brasil, 2016; Oliveira et al. 2018), e calculou-se os valores correspondentes as repetições predefinidas cada amostra (Figura 18). O teor de umidade foi calculado pela equação (01):

$$U(\%) = \frac{m_f - m_s}{m_f} \times 100 \quad (\text{eq. 01})$$

Onde: U : Teor de umidade;

m_f : massa fresca das drupas imediatamente após a coleta antes do processo de secagem;

m_s : massa seca ou peso seco das drupas após a secagem.

4.2.3 Determinação da cinética de secagem

O teor de umidade inicial das amostras foi obtido, e estas submetidas à secagem em estufa à 30°C por 72 horas, condição adotada por representar um método mais brando de remoção de umidade, conforme recomendações para sementes florestais (Governici et al. 2020).

As massas foram registradas em quatro tempos pré-estabelecidos (0, 24, 48 e 72 h), mantendo-se as amostras distribuídas em camada única para garantir uniformidade na troca de calor e massa durante todo o processo (Figura 18).

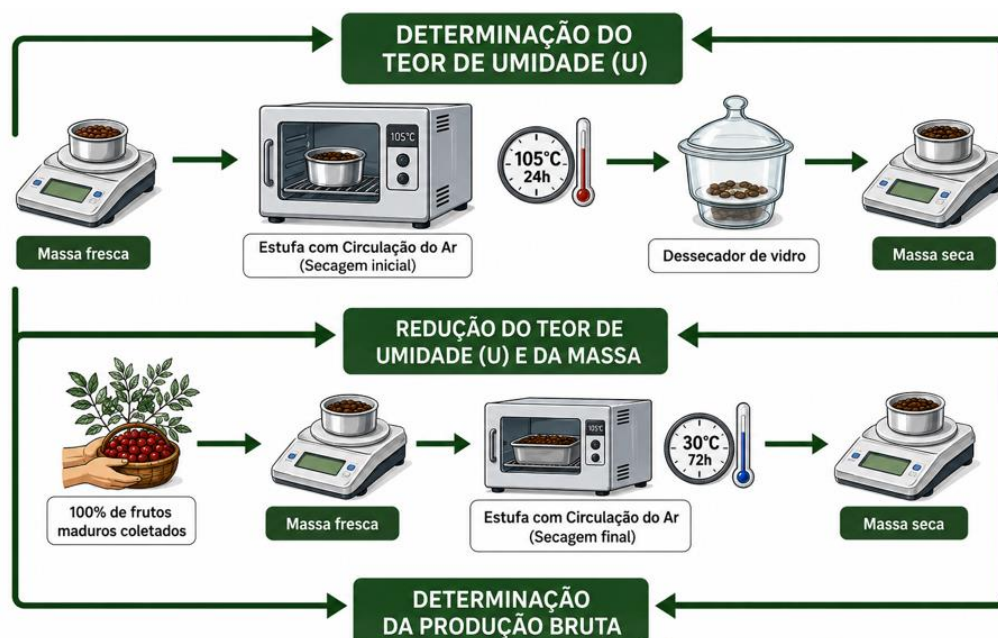


Figura 18. Determinação do teor de umidade (U) e cinética de secagem das drupas de *S. terebinthifolia*. Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com auxílio das ferramentas Canva, ChatGPT (OpenAI) e Gemini (Google).

A escolha dos tempos de avaliação priorizou a captura das fases representativas da cinética de secagem (Ferreira-Junior et al. 2021), considerando que variações intermediárias tendem a apresentar baixa contribuição informativa para o ajuste dos modelos matemáticos.

4.2.4. Análise dos dados

Os modelos matemáticos utilizados para determinar a cinética de secagem foram selecionados e avaliados com base na literatura (Keneni et al. 2019; Ferreira Junior et al. 2021; Srivastava & Sit, 2024). Posteriormente, o ajuste dos dados e teste de adequação conduzidos utilizando ferramentas específicas disponíveis para a escolha de modelos (Ji et al. 2022; Yun et al. 2024 Liang et al. 2025; Canal et al. 2025).

O processamento para análise dos dados foi realizado no ambiente computacional na linguagem R, na versão 4.4.1 (R Core Team, 2024). A manipulação e organização dos dados no formato *long*, utilizou-se o pacote *tidyr* (Wickham et al. 2023).

As operações de agrupamento e transformação foram executadas com o pacote *dplyr* (Wickham et al. 2023), e as representações gráficas foram elaboradas por meio do pacote *ggplot2* (Wickham, 2016). Os modelos de regressão não linear (*nls*) e linear (*lm*) foram ajustados utilizando as funções nativas do pacote *stats*.

Com base nos critérios de seleção empregados para a comparação de modelos (R^2 e EMSE), a correlação entre as variáveis escolhidas foi analisada e testados e comparados os seguintes modelos não lineares nomeadamente, exponencial decrescente e hiperbólico (Tabela 6).

Tabela 6 - Modelos exponencial decrescente e hiperbólico utilizados no ajuste.

Modelos	Equação	Referência
Exponencial decrescente	$P = P_0 * e^{-\beta * T}$	Wang et al. 2024
Hiperbólico	$P = \frac{P_0}{(1 + \beta_1 * T)}$	Anzanello & Fogliatto, 2007

Nota: β e β_1 : Coeficientes do modelo. T: Tempo. P: Peso final das drupas de *S. terebinthifolia* que é variável dependente do modelo (g). P_0 : Peso inicial das drupas de *S. terebinthifolia* (g).

A escolha do melhor modelo (ideal) foi baseada no valor do coeficiente de determinação (R^2) (Yun et al. 2024), valor do Erro Médio Quadrado das Estimativas (EMSE) (Liang et al. 2025) e o Critério de Informação de Akaike (AIC) (Tabela 7). Segundo as diretrizes pré-estabelecidas em comparação de modelos, a escolha foi pelo maior valor de R^2 e menor valor do EMSE e de AIC (Keneni et al. 2019, Yun et al. 2024).

Os parâmetros foram estimados quanto a significância estatística (teste I) e consistência biológica dos coeficientes foram analisados, assegurando que os modelos selecionados apresentassem coerência matemática e interpretação fisiológica compatível com o processo de secagem (Keneni et al. 2019). A precisão do ajuste e a magnitude dos erros residuais foram avaliados pelo Qui-quadrado reduzido (X^2_{red}).

Tabela 7 - Parâmetros para escolha de modelo ideal.

Designação	Equação	Parâmetro	Classificação	Referência
Coeficiente de determinação	$R^2 = 1 - \frac{\sum(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2}$	$0.70 < R^2 \leq 1.0$	Muito bom	Yun et al. 2024; Wang et al. 2024
		$0.6 < R^2 \leq 0.70$	Bom	
		$0.5 < R^2 \leq 0.6$	Satisfatório	
		$R^2 \leq 0,5$	Insatisfatório	
Raiz do erro quadrático médio	$EMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}}$	$< 10\% \text{ da } \bar{x}$	Muito bom	Liang et al. 2025; Jinhua Ji et al. 2022
		$< 15\% \text{ da } \bar{x}$	Bom	
		$15\% - 20\% \text{ da } \bar{x}$	Satisfatório	
		$> 20\% \text{ da } \bar{x}$	Insatisfatório	

Nota: R^2 : coeficiente de determinação. Se R^2 estiver próximo de 1, o modelo explica a maior parte da variabilidade dos dados, indicando bom ajuste, e se R^2 estiver próximo de 0, o modelo pouco explica a variabilidade dos dados (Yun et al. 2024). $\hat{y}_i$: os valores estimados pelo modelo. y_i : representa os valores observados. n: o número total de observações. RMSE: raiz do erro médio quadrado das estimativas ou raiz do erro quadrado médio dos resíduos fornece uma visão intuitiva da magnitude do erro comparável aos dados reais (Liang et al. 2025). $\bar{x}$: média.

A velocidade de perda de umidade, foi determinada por meio da taxa de variação temporal da equação do modelo escolhido (dU/dt), que permitiu a quantificação do fluxo de massa instantânea. A determinação do ponto assintótico da curva, teve por objetivo caracterizar o limite teórico de desidratação sob as condições experimentais (equilíbrio higroscópico do sistema).

4.3. RESULTADOS

4.3.1 Cinética de secagem e ajuste de modelos matemático do teor de umidade (U) em drupas de *Schinus terebinthifolia*

O teor de umidade inicial das drupas de *S. terebinthifolia* foi aproximadamente 10% a 105°C. Após 72h, observou-se uma redução acentuada da massa e do teor de umidade. Essa redução mostrou-se convergente com os teores obtidos na secagem inicial a 105°C (10%), indicando que o método mais brando, resultou em um teor de umidade comparável ao método mais rigoroso, o que indica eficiência do procedimento de secagem a 30°C para uniformização do conteúdo de água nas matrizes analisadas.

4.3.1.1 Validação do ajuste de modelos para a redução do teor de umidade (U) de drupas de *Schinus terebinthifolia*

Os ajustes dos modelos matemáticos para a cinética de perda de umidade das drupas de *S. terebinthifolia*, indicou que o modelo hiperbólico apresentou o melhor desempenho estatístico em comparação ao modelo exponencial (Tabela 8).

O modelo hiperbólico explicou 97,9% da variabilidade dos dados, e maior parcimônia apresentando menor valor para critério de informação de Akaike ($AIC = 196,52$) e erro médio das estimativas ($RMSE = 0,55$) (Tabela 8). Enquanto o modelo exponencial, apesar de ser muito citado na literatura como um bom modelo para representar a perda de umidade, ele apresentou valores de erros superiores ($AIC = 294,98$ e $RMSE = 0,84$) e menor coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{Adj} = 0,95$), indicando um ajuste menos preciso aos dados observados durante o período de secagem das drupas de *S. terebinthifolia*.

Observa-se também que, o modelo hiperbólico apresentou a magnitude do erro verificada pelo Qui-quadrado reduzido ($X^2_{red} = 0,3078$), que foi significativamente inferior á do modelo exponencial ($X^2_{red} = 0,7194$) (Tabela 8), validando a precisão do ajuste para descrever a perda de água livre e o alcance do equilíbrio higroscópico do sistema.

Tabela 8 - Comparação dos modelos hiperbólico e exponencial decrescente aplicados para o teor de umidade (U) em drupas de *S. terebinthifolia* ($p < 0,001$).

Modelo	R ² Ajd	AIC	RMSE	X ² red	Equação ajustada
Hiperbólico	0,979	196,52	0,55	0,308	$U = \frac{11,39}{1 + 0,0695t}$
Exponencial	0,95	294,98	0,84	0,719	$U = 11,133e^{-0,0324t}$

Nota: Ep: Erro padrão da média. R²Adj: Coeficiente de determinação ajustado. t: tempo de secagem (em horas). U: teor de umidade (em %). AIC: Critério de Informação de Akaike. X²red: Qui-quadrado reduzido.

Esta superioridade do modelo hiperbólico para descrever a cinética de secagem, também foi confirmada pelo valor estimado para umidade inicial (β_0) de 11,39% e uma taxa de secagem (β_1) de 0,0695, com p -valor significativo (Tabela 9). Esta taxa de secagem constante encontrada, indica alta permeabilidade das estruturas externas de drupas de *S. terebinthifolia* à dissipação de vapor de água o que permitiu que as drupas atingissem níveis de umidades baixas ao final de 72h de exposição.

Tabela 9 - Estimativa dos parâmetros do modelo hiperbólico para teor de umidade (U) em drupas de *S. terebinthifolia*.

Parametro	Estimativa	Ep	Valor - t	p - valor
β_0	11,39	0,1029	110,72	<0,0001***
β_1	0,0695	0,0021	32,56	<0,0001***

Nota: β_0 : intercepto do modelo hiperbólico, representa o teor de umidade inicial estimado no tempo zero. β_1 : representa a taxa de secagem ou constante de perda de umidade em drupas de *S. terebinthifolia* no campo. t_{valor} : Estatística t de Student; $\Pr(>|t|)$: nível de significância observado (valor- p). Significância: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ''

4.3.1.2 Diagnóstico estatístico por análise de resíduos para teor de umidade (U)

Os resíduos do modelo exponencial mostraram comportamentos sistemáticos, apresentando falhas em capturar momentos específicos de secagem. No entanto, o modelo hiperbólico apresentou uma distribuição aleatória dos resíduos em torno de zero (Figura 19), com resíduos apresentando homoscedasticidade e ausência de padrões sistemáticos ao longo do tempo de secagem (Figura 19), com alta previsão preditiva dos valores observados *versus* estimados confirmando a estabilidade do modelo escolhido.

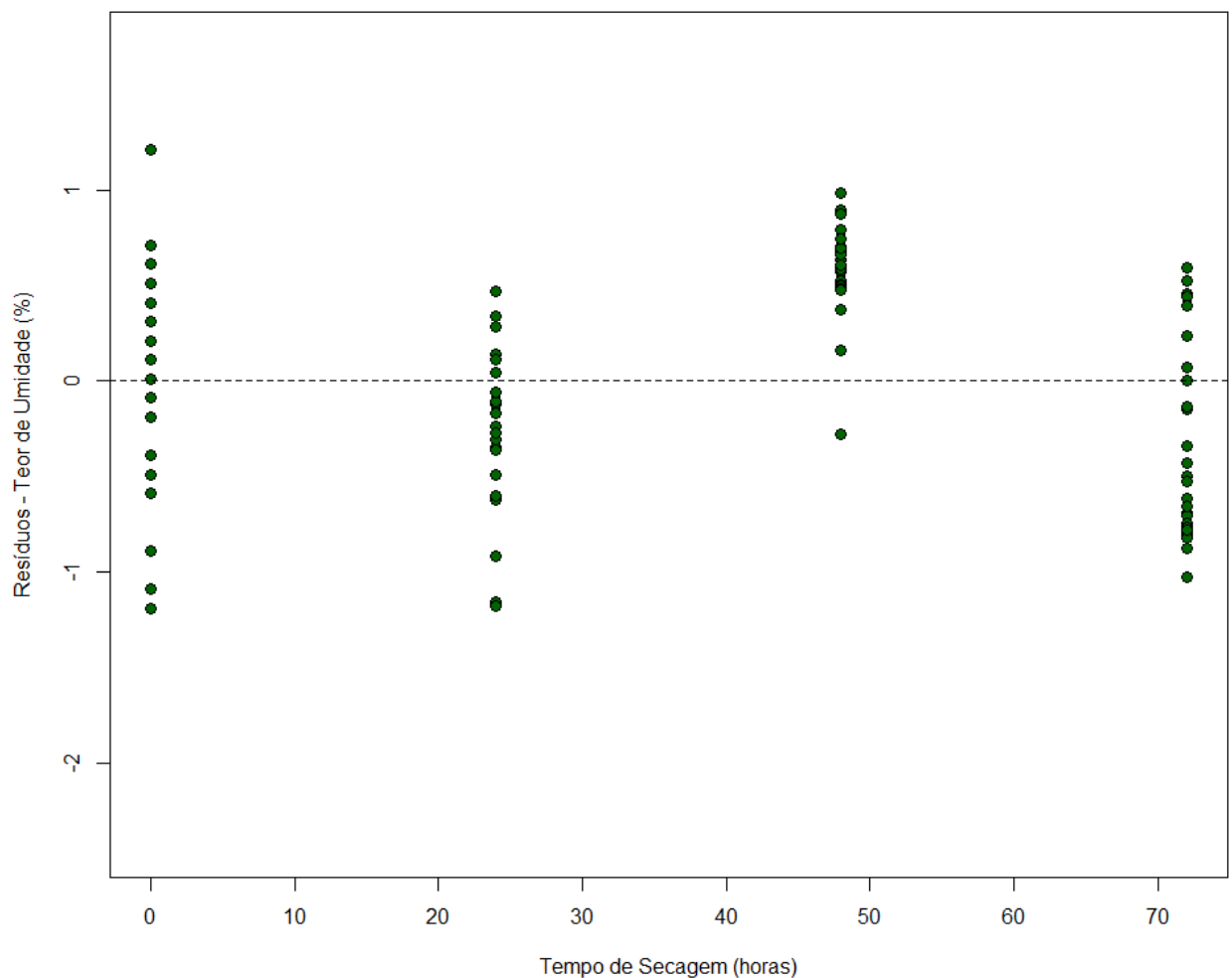


Figura 19 - Gráfico de resíduos do modelo hiperbólico para a cinética de secagem em drupas de *S. terebinthifolia*, com valores observados versus estimados (Dados alinhados á linha de identidade 1:1).

4.3.1.4 Velocidade de redução de umidade (U) e determinação do tempo de estabilização cinética

Os parâmetros do ajuste do modelo hiperbólico e a cinética observada ao longo do tempo de experimental, mostra uma máxima eficiência na remoção de água livre (Fase I), em seguida a resistência do pericarpo começam a dificultar a saída da água interna (Fase II), e depois deste intervalo de tempo a secagem adicional torna-se estatisticamente insignificante que é atingida a estabilidade higroscópica (Fase III) (Figura 20).

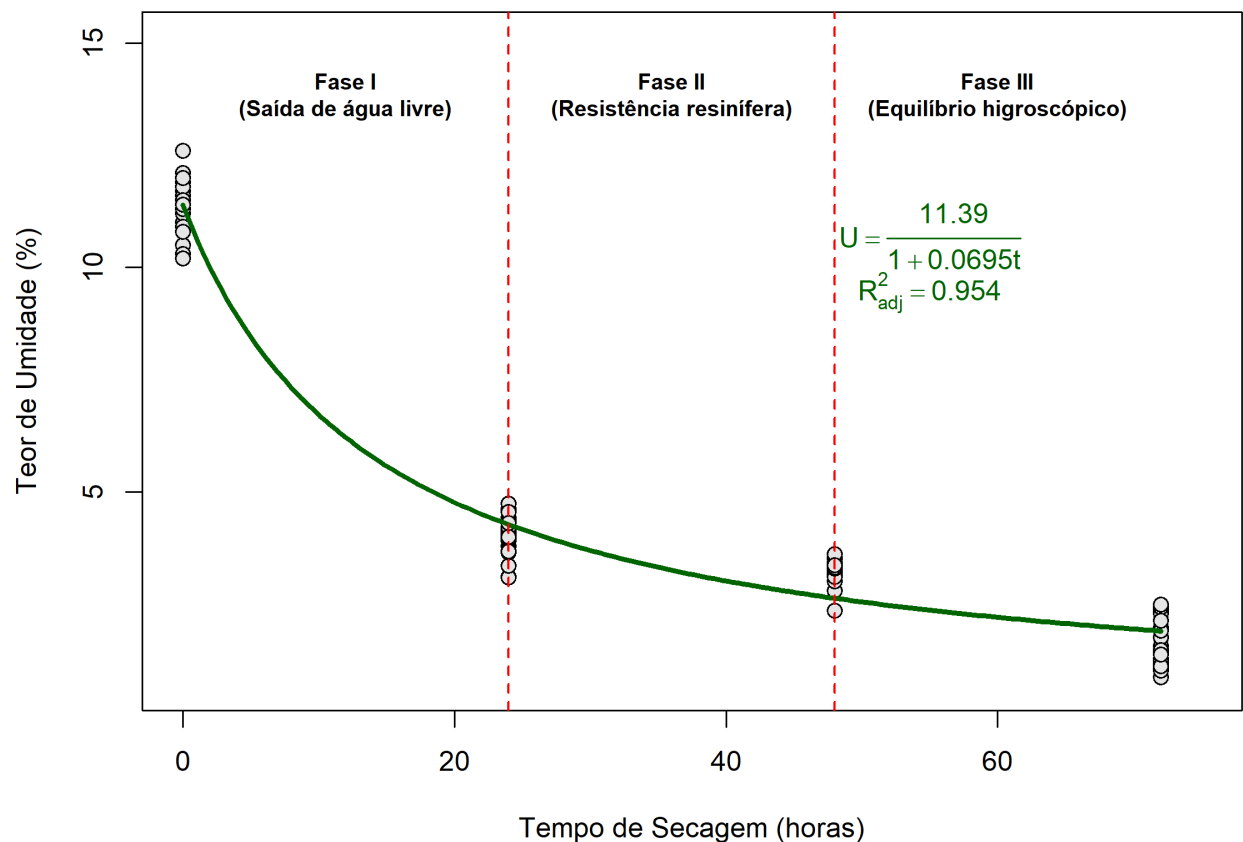


Figura 20 - Cinética de secagem de drupas de *S. terebinthifolia* ajustado ao modelo hiperbólico. O eixo x representa o tempo de secagem em horas, e o eixo y representa o teor de remoção de umidade (U) em porcentagem por horas (%). Os pontos representam os valores observados; e a linha continua o ajuste matemático hiperbólico, evidenciando a taxa de perda de água ao longo do tempo de exposição (72h).

A eficácia do processo de desidratação foi avaliada por meio da taxa instantânea de perda de umidade (Figura 21), na qual observou-se que a velocidade de secagem é máxima no

estágio inicial ($0,7916\%h^{-1}$). Esse comportamento evidencia a rápida evaporação da água livre presente no pericarpo da drupa de *S. terebinthifolia*. Uma redução acentuada de aproximadamente 80% da taxa de remoção ocorreu nas primeiras 24h, indicando a transição para o período de taxa decrescente reduzindo-se drasticamente para $0,1112\% h^{-1}$. Observa-se na Figura 21, que a entrada da Fase III coincide com a queda da taxa de remoção para valores próximos a zero. Confirmando o ponto assintótico estimado em 1,9% de umidade, que é o valor que representa o equilíbrio higroscópico do sistema (Figura 21), e sendo assim, diante destes dados estabeleceu-se que às 48 horas ($0,0421\% h^{-1}$) como o tempo ideal para a secagem das drupas de *S. terebinthifolia*, garantindo a estabilidade microbiológica. Após este intervalo, a taxa de secagem torna-se residual, com valores inferiores a $0,05\%h^{-1}$ considerado o tempo crítico de processamento, e a permanência das drupas na estufa após o período resultará em ganhos marginais de desidratação ($<0,1\%$ de variação).

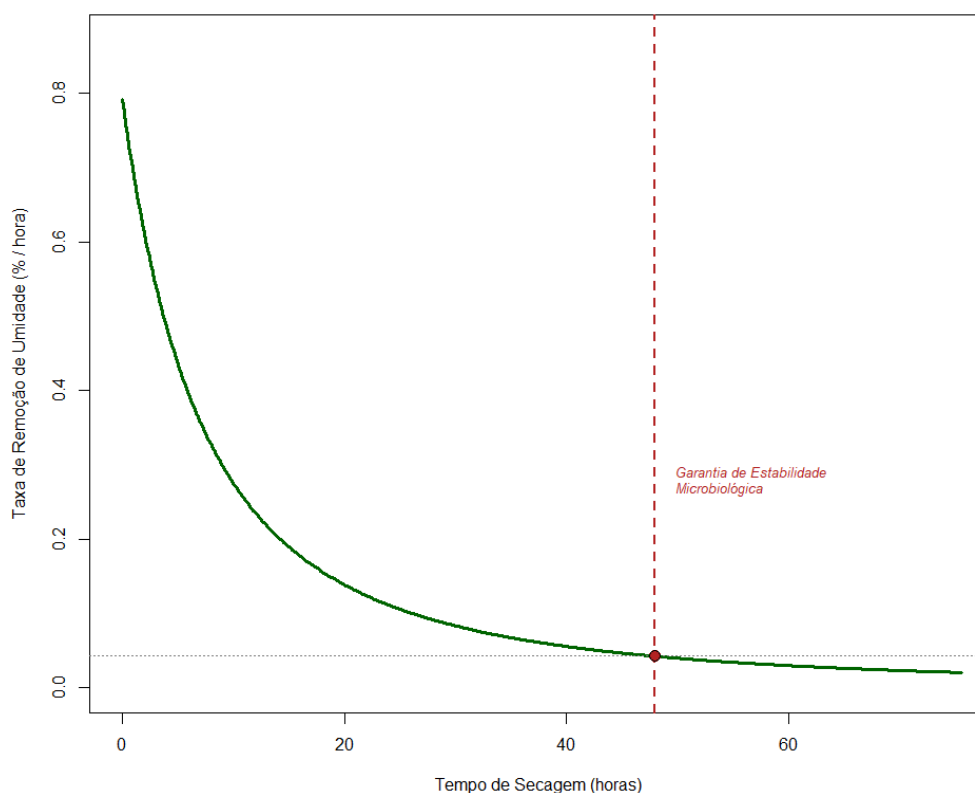


Figura 21 - Velocidade de perda de umidade (U) ao longo do tempo aplicado para o ajuste hiperbólico em drupas de *S. terebinthifolia*. O eixo x representa o tempo de secagem em horas

(h), e o eixo y representa a taxa de remoção de umidade em percentagem por horas (%h⁻¹), e um valor assintótico de y = 1,9%.

4.3.2 Curva de redução da massa de drupas de *Schinus terebinthifolia*

Tendência de diminuição progressiva nos valores das variáveis de massa ao longo do tempo de secagem (0h, 24h, 48h e 72h) foi constatada. No tempo inicial (t₀ = 0h) à temperatura de 105°C, a massa das drupas de *S. terebinthifolia* variou de 132,3 a 3058,3g. Após 72h de secagem em temperatura branda (T = 30°C), a massa das drupas passou a variar de 122,4 a 2780,3g. Analogamente, a redução gradual na variabilidade dos dados foi constatada com a redução da média (838 g para 317,1 g) e da mediana (470,4 g a 427,6 g) (Tabela 10).

Tabela 10 - Estatísticas descritivas da massa seca em gramas das drupas de *S. terebinthifolia*.

Tempo	Min - Máx	Q1	$\bar{x}$	Q3	Med
Ps - 0h	132,3 – 3058,3	347,8	838	1033,6	470,4
Ps - 24h	128,2 – 2923,5	332,8	802,9	986,6	451,8
Ps – 48h	124,3 – 2.829,9	321,5	777,4	951,0	438,2
Ps – 72h	122,4 – 2780,3	317,1	764,9	940,3	427,6

Nota: Ps: peso da massa seca das drupas de *S. terebinthifolia*. Min: mínimo. Máx: máximo. Q1:1º Quartil. Q3:3º Quartil.: média. Med: mediana.

O comportamento individual das matrizes foi analisado, observou-se estratificação na velocidade de perda de massa para drupas de *S. terebinthifolia*, porém todas mantiveram a tendência de redução (Figura 22). A dispersão das curvas passado 24h, indica um sinal de variabilidade intrínseca entre as indivíduo, possivelmente associada a características morfológicas das drupas da planta progenitora, seguido por uma tendência á estabilização.

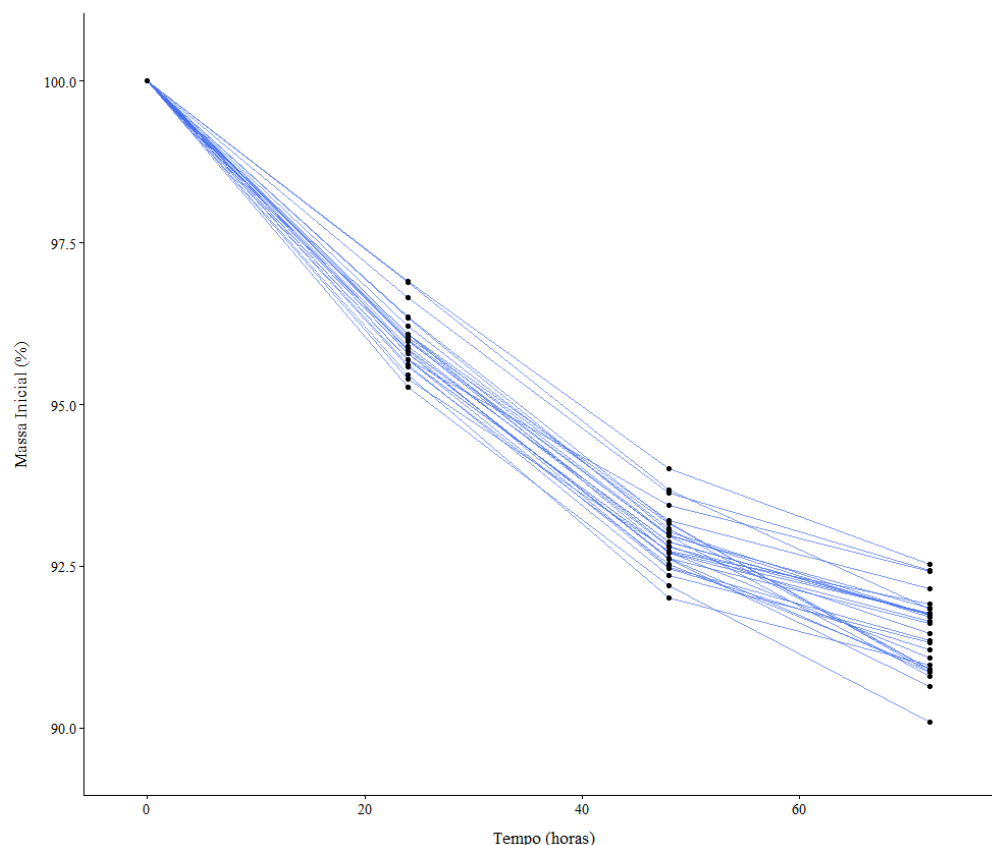


Figura 22 - Redução percentual da massa das drupas de *S. terebinthifolia* ao longo do tempo de secagem.

4.3.2.1 Validação do ajuste do modelo para a redução da massa de *Schinus terebinthifolia*

Os modelos testados apresentaram um ajuste satisfatório aos dados experimentais, com coeficientes de determinação ajustados (R^2_{Adj}) superiores a 0,94, e com 114 graus de liberdade, apresentando convergência e significância estatística para todos os parâmetros estimados ($p < 0,001$), indicando que todos os modelos propostos descrevem a cinética da redução de massa de *S. terebinthifolia*.

No entanto, o modelo hiperbólico foi selecionado como o mais representativo para descrever a cinética de redução da massa em drupas de *S. terebinthifolia*. A escolha baseou-se na obtenção do menor valor para o AIC = 254,50 e RMES = 0,706, aliados ao maior R^2_{Adj} = 0,954, indicando uma capacidade preditiva superior em comparação ao modelo exponencial (Tabela 11). A magnitude do erro verificada pelo Qui-quadrado reduzido (X^2_{red} = 0,507) para o modelo hiperbólico, foi significativamente inferior á do modelo experimental (X^2_{red} = 0,56), apresentou

um erro padrão menor ($E_p = 0,71240$) em relação ao modelo exponencial decrescente ($E_p = 0,7484$) (Tabela 11), indicando que os valores estimados pelo modelo hiperbólico estão mais próximo dos dados originais, confirmando assim a escolha.

Tabela 11 - Comparação dos modelos hiperbólico e exponencial aplicados para redução da massa de drupas de *S. terebinthifolia* ($p < 0,001$).

Modelo	R ² Ajd	AIC	RMSE	X ² red	Equação ajustada
Hiperbólico	0,954	254,50	0,706	0,507	$P = \frac{99,51}{(1 + 0,013 * T)}$
Exponencial	0.949	265,95	0,742	0,560	$P = 99,44 * e^{-0,0013 * T}$

Nota: R²Adj: Coeficiente de determinação ajustado. T: tempo de secagem das drupas de *S. terebinthifolia* (em horas). AIC: Critério de Informação de Akaike. RMSE: erro médio quadrado das estimativas ou raiz do erro quadrado médio dos resíduos. X²red: Qui-quadrado reduzido.

As estimativas dos parâmetros do modelo hiperbólico ajustado para a redução da massa das drupas de *S. terebinthifolia*, apresentou coeficientes significativos ($p < 0,0001$), onde o β_0 determinou com precisão a massa inicial das matrizes analisadas, apresentando valores residuais de erro padrão da estimativa (E_p), validando a escolha (Tabela 12).

Tabela 12 - Estimativa dos parâmetros do modelo hiperbólico ajustados para a redução de massa das drupas de *S. terebinthifolia*.

Parametro	Estimativa	E_p	Valor - t	p - valor
P_0	9.951e+01	1.135e-01	876.79	< 2e-16 ***
β_1	1.330e-03	2.838e-05	46.86	< 2e-16 ***

E_p : erro padrão da média. P_0 : Massa inicial ($t = 0$). β_1 : parâmetro correspondente á taxa de redução de massa de *S. terebinthifolia* (h^{-1}). Valor_t: Estatística t de Student; $Pr(>|t|)$: Nível de significância observado (valor - p)
Significância: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1.

4.3.2.2 Diagnóstico estatístico por análise de resíduos para teor de umidade (U)

O modelo hiperbólico apresentou robustez e estabilidade numérica, com uma distribuição aleatória dos resíduos contido dentro dos limites de -1,5% á 1,5%, minimizando a ocorrência de

erros expressivos de estimativa ao longo do pedido analisado, com pequenas fases de subestimativa e superestimativa da massa percentual, que é comum em fenômenos biológicos (Figura 23).

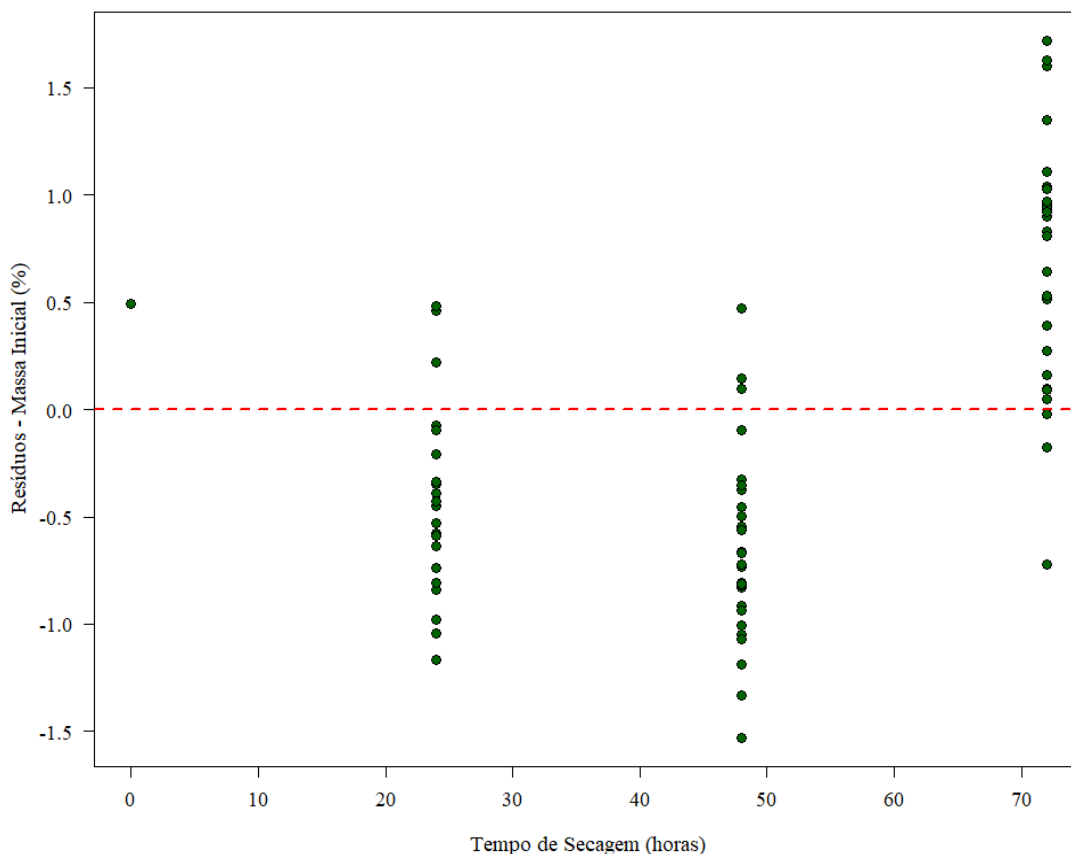


Figura 23 - Gráficos de *resíduos* para o ajuste do modelo hiperbólico, aplicado a redução da massa de drupas de *S. terebinthifolia*. Os pontos representam os valores observados; e a linha continua o ajuste matemático hiperbólico, evidenciando a taxa de perda de massa ao longo do tempo de exposição (72h).

4.3.2.3 Estabilidade e redução da massa das drupas de *Schinus terebinthifolia* ajustado ao modelo hiperbólico

O modelo hiperbólico apresentou um coeficiente de determinação ajustado superior, com estimativas que indicaram valor inicial da massa percentual das drupas de *S. terebinthifolia* ($R^2_{Ajd} = 0,954$). Esse resultado, indica que o processo de secagem teve início com quase toda massa intacta, o que é corroborado pela taxa de redução explicando bem a variabilidade dos dados originais (Figura 24), em comparação ao ajuste do modelo exponencial decrescente que

explicou a menor variação na massa percentual ($R^2 = 95\%$) e maiores desvios nos pontos finais da secagem. A estabilidade foi atingida a partir de 48h (Figura 25), apresentando uma taxa de redução da massa, com assíntotas tendendo para zero, mostrando o fim do processo de transferência de massa, atingindo equilíbrio termodinâmico restando uma massa de 93,25%.

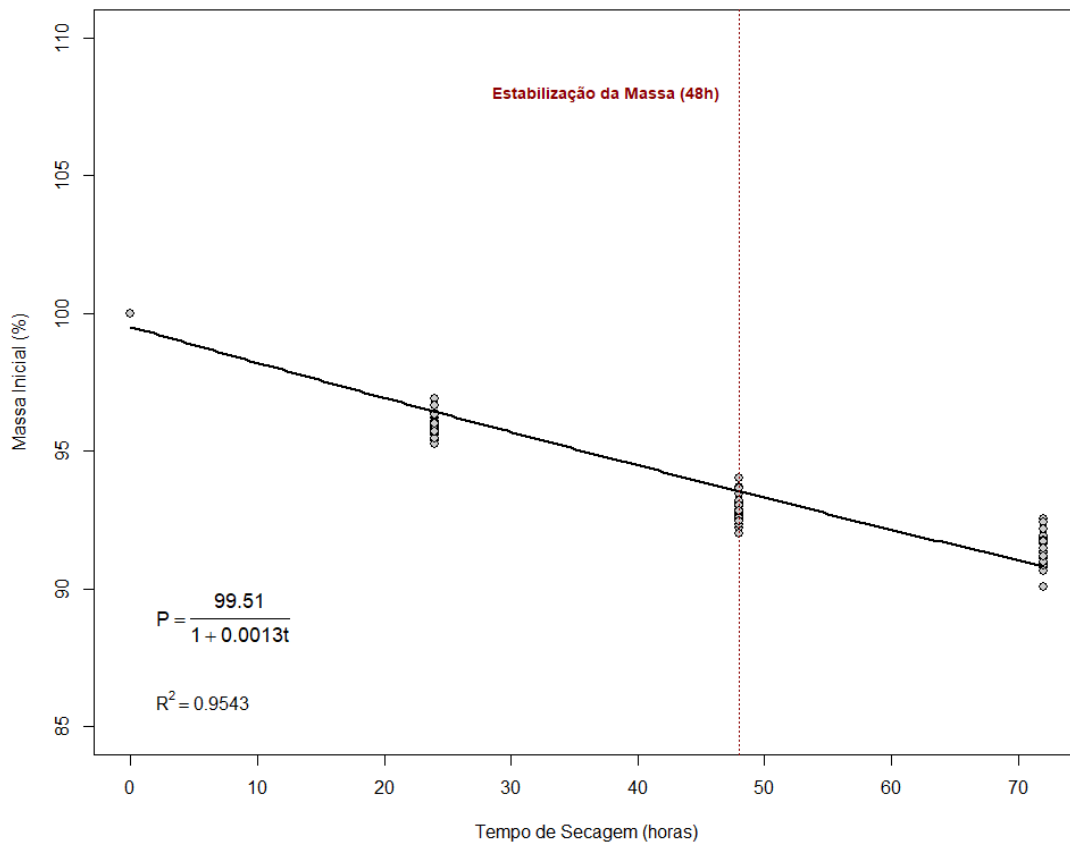


Figura 24 - Redução percentual da massa das drupas de *S. terebinthifolia* ao longo do tempo de secagem com ajuste de modelo hiperbólico. Os pontos representam os valores observados; e a linha continua o ajuste matemático hiperbólico, evidenciando a taxa de perda de água ao longo do tempo de exposição (72h).

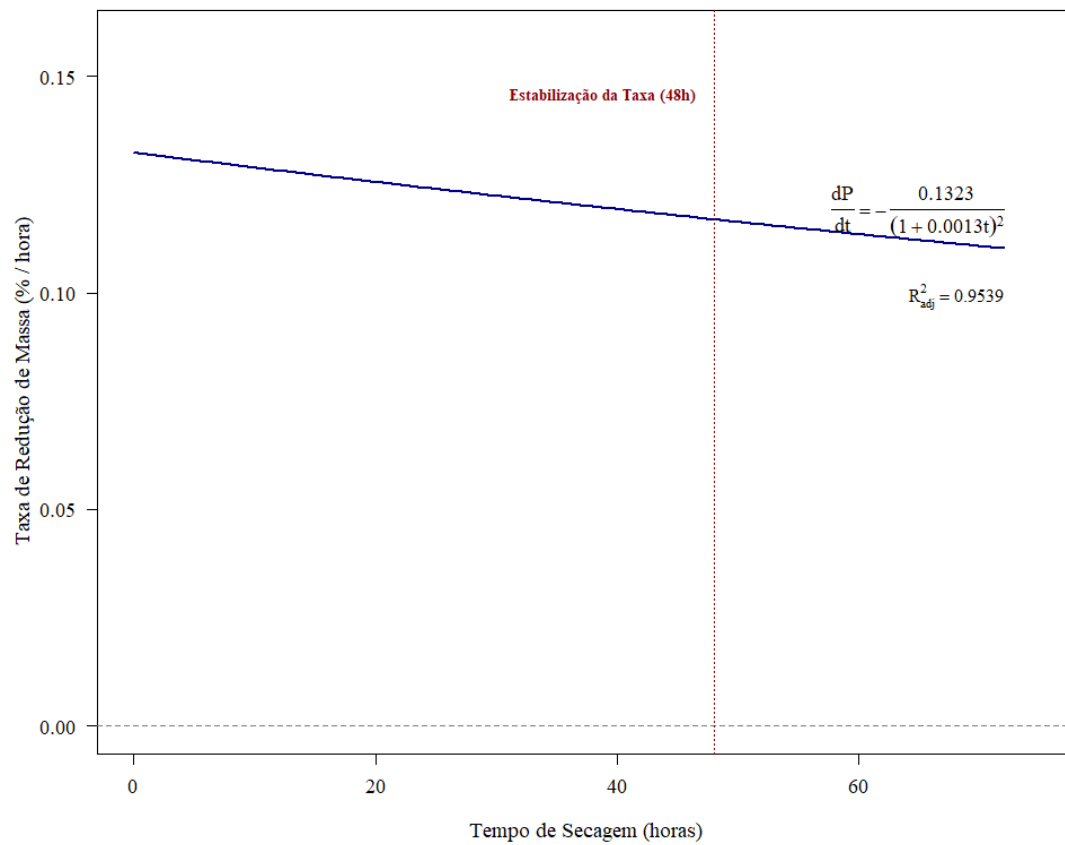


Figura 25 – Taxa de redução da massa de drupas de *S. terebinthifolia*.

4.4. DISCUSSÃO

4.4.1 Dinâmica da redução do teor de umidade (U)

O teor de umidade inicial obtido, em torno de 10%, evidenciou que as drupas de *S. terebinthifolia* já apresentavam conteúdo hídrico relativamente reduzido no momento da coleta e com a secagem conduzida em temperatura moderada (30 °C) mostrou capacidade de alcançar valores próximos aos obtidos pelo método padrão a 105 °C, indicando que condições térmicas menos intensas podem ser suficientes para uniformizar o conteúdo de água do material. Esse resultado possui relevância prática, uma vez que temperaturas mais baixas tendem a minimizar danos estruturais e alterações metabólicas, favorecendo a manutenção da integridade fisiológica em materiais vegetais destinados ao armazenamento ou à produção de mudas (Berjack & Pammenter, 2007; Brasil, 2009; Oliveira et al. 2018; Governici et al. 2020; Walters & Pence, 2021).

4.4.1.1 Eficiência do modelo hiperbólico para o teor de umidade (U)

Sob a perspectiva da modelagem matemática, o teor de umidade ajustou-se bem ao modelo hiperbólico (RMSE = 0,55; R^2_{Adj} = 0,98 e AIC = 196,52) em relação ao exponencial (RMSE=0,84; R^2_{Adj} = 0,95 e AIC = 294,98), apresentando rápida perda de água livre nas primeiras 24h e posterior estabilização. Essa superioridade pode ser atribuída às características morfológicas das drupas de *S. terebinthifolia* e a metodologia de secagem utilizada.

Atendendo que as drupas foram submetidas à estufa de forma integral, sem beneficiamento prévio (extração de semente), o pericarpo atuou como barreira física e biológica à saída da água. No entanto, por ser uma estrutura riquíssima em canais resiníferos, o pericarpo integro impõe uma resistência crescente à transferência de massa à medida que a umidade livre é removida. Por outro lado, o modelo exponencial pressupõe uma taxa de perda de água mais rígida, tendendo a subestimar a retenção de água nas fases finais da secagem. Enquanto o modelo hiperbólico descreve com maior fidelidade essa desaceleração progressiva da secagem criada pela resistência imposta pelos tecidos externos da drupa de *S. terebinthifolia* não beneficiada (frutos integros).

Neste contexto, esse comportamento indica que a estrutura da drupa (pericarpo) é um fator determinante na dinâmica de perda de água, exigindo modelos que capturem complexidade da barreira imposta pelo pericarpo. A literatura enfatiza que a utilização de modelos que consideram taxas de secagem variáveis e resistência estrutural fornecem melhores previsões da perda de umidade em produtos agrícolas (Peleg et al. 2022). Estudos feitos com outros materiais vegetais, como por exemplo as folhas de *S. terebinthifolia*, ajustados pelos modelos modificados de Henderson & Pabis ou Midilli (Gomes et al. 2012; Melo et al. 2013), indicaram que a morfologia específica das drupas exige modelos como hiperbólico para captar seu comportamento de dissipação de umidade (Goneli et al. 2014).

4.4.1.2 Análise crítica da cinética de secagem e adequação do modelo hiperbólico

No ponto de vista do conteúdo de água perdido após 48h, a secagem evoluiu da dissipação superficial para a retenção de água ligada, aproximando-se do equilíbrio higroscópico de forma previsível. Portanto, este intervalo de tempo configurou-se como o ponto de máxima eficiência. Este é o ponto em que a amostra atinge balanço estável com a umidade do ambiente (Noguera & Iturgaiz, 2023).

Os modelos testados apresentaram elevado poder explicativo ($R^2_{Adj} > 0,95$), indicando que as equações foram capazes de capturar a tendência geral da cinética de redução da massa com alta precisão ao longo do tempo, minimizando os resíduos entre os valores observados e estimados. Entretanto, a análise comparativa evidenciou que a escolha do modelo mais adequado não deve se apoiar exclusivamente no coeficiente de determinação, mas considerar simultaneamente indicadores do erro estabilidade dos seus parâmetros (baixo erro padrão que equivale a alta estabilidade) e coerência com a dinâmica física do processo.

O modelo exponencial decrescente mostrou também desempenho consistente ao representar um sistema em que a taxa de secagem foi proporcional ao conteúdo de água remanescente, comportamento amplamente reportado para materiais biológicos submetidos a secagem em condições controladas (Ferreira Junior et al. 2021; Siqueira et al. 2012), porém não superou os resultados estatísticos do modelo hiperbólico.

Apesar do modelo exponencial ser muito destacado em estudos desta natureza, este não superou as qualidades apresentada pelo modelo hiperbólico, a destacar a homoscedasticidade, por mostrar a distribuição dos resíduos em torno de zero, confirmando assim a sua robustez.

4.4.2 Cinética de redução de massa de drupas de *Schinus terebinthifolia*

A redução gradual da massa das drupas de *S. terebinthifolia* observada ao longo do período experimental refletiu o comportamento esperado para materiais biológicos submetidos à secagem convectiva, em que a remoção inicial de água ocorre de forma mais pronunciada, seguida por fase de diminuição progressiva da taxa de perda hídrica.

Esses padrões estão associados à transição entre a remoção da água superficial e domínio dos mecanismos difusivos internos, frequentemente descritos na literatura de cinética de secagem de sementes e frutos (Kenení et al. 2019; Srivastava & Sit, 2024). A ausência de variações bruscas nas curvas indicou que o processo ocorreu maioritariamente em regime de taxa decrescente, o que é coerente com estruturas vegetais que apresentam barreiras internas à transferência de umidade.

A variabilidade inicial registrada na massa das drupas de *S. terebinthifolia* sugeriu influência direta da heterogeneidade fisiológica do material coletado em campo, como em espécies florestais, mostrando que é comum verificar diferenças no estágio de maturação dentro de uma mesma planta ou panícula, e que podem resultar em amplitudes consideráveis no teor de água inicial, afetando a dinâmica de secagem e a resposta aos tratamentos térmicos (Neves et al. 2018; Vitória et al. 2018).

Nesse contexto, o beneficiamento e a seleção prévia das amostras assumem papel central na redução do erro experimental, permitindo que a variabilidade observada reflita predominantemente o processo físico de secagem e não diferenças fisiológicas intrínsecas entre amostras.

4.4.2.1 Eficácia do modelo hiperbólico para a redução de massa de drupas de *Schinus terebinthifolia*

Comparando os dois modelos testados, observou-se que o hiperbólico superou o exponencial na representação da cinética de perda de massa das drupas de *S. terebinthifolia*,

explicando 95,4% da variação. Este resultado foi confirmado pela obtenção de menores valores de resíduos (RMSE = 0,706) e maior parcimônia (AIC=254,50), demonstrando uma capacidade preditiva superior para descrever a redução de massa ao longo de observação. Estes achados corroboram com estudos similares, onde diferentes indicadores estatísticos capturam aspectos distintos da qualidade do ajuste (Draper & Smith, 1998; Rawlings et al. 1998). Enquanto o modelo exponencial apresentou um coeficiente de determinação ligeiramente inferior, com os valores de erro associados que evidenciaram maiores dispersão entre valores observados e estimados ($R^2 = 0,949$; RMES = 0,742e AIC = 265,95), revelando menor precisão preditiva.

Essa diferença entre medidas de ajuste estatísticas ressalta um ponto fundamental em estudos de cinética de secagem, ou seja, modelos com desempenho estatístico semelhante podem refletir interpretações físicas distintas do fenômeno, e assim, a escolha do modelo hiperbolico mostrou-se justificável não apenas pelo equilíbrio entre ajuste e erro, mas também por sua interpretação mecanística consistente com processos dominados por difusão, frequentemente descritos em sementes e estruturas vegetais de composição semelhante (Keneni et al. 2019; Ataides et al. 2023).

A constante de redução estimada no modelo hiperbolico ($\beta_1 = 0,0013$), indicou processo relativamente lento, compatível com o uso de temperatura branda e caráter progressivo da remoção de água observada experimentalmente. Essa interpretação reforça a plausibilidade física do ajuste, uma vez que temperaturas moderadas tendem a reduzir gradientes de pressão de vapor e, conseqüentemente, a taxa de difusão hídrica interna.

Além da avaliação estatística, o comportamento contínuo das curvas ajustadas sugeriu que o sistema não apresentou mudanças abruptas na resistência interna à transferência de água durante o período analisado. Isso indica que o processo de secagem ocorreu de forma estável, sem evidência de colapsos estruturais ou alterações significativas no material, aspecto relevante quando se considera a aplicação prática do protocolo em escala operacional (He et al. 2021; Rurush et al. 2021).

4.4.2.1 Viabilidade tecnológica da cinética de secagem e adequação ao modelo preditivo

Do ponto de vista aplicado, a combinação entre secagem em temperatura moderada e modelagem matemática pode representar ou abordagem estratégica para o manejo pós-colheita

de espécies florestais e possibilitar prever a dinâmica de redução de massa para otimizar o tempo de secagem, reduzir custos energéticos e estabelecer protocolos mais seguros para conservação do material vegetal.

Em programas de restauração ecológica e produção de mudas, essa previsibilidade operacional pode contribuir significativamente para a padronização de procedimentos e aumento da eficiência do armazenamento de frutos e sementes (Governici et al. 2020; Walters & Pence, 2021).

Atendendo a importância económica de *S. terebinthifolia*, sendo muito utilizada em indústria de processamento e exportada para países da Europa, na forma de especiaria e como condimento alimentar, a viabilidade de sua conservação tem sido um desafio pós-colheita.

De forma geral, os resultados indicaram que a modelagem matemática constitui uma ferramenta robusta para descrever a cinética de secagem das drupas de *S. terebinthifolia*, permitindo integrar interpretação física, desempenho estatístico e aplicabilidade prática. A convergência entre os modelos avaliados reforça a consistência do comportamento observado, enquanto a superioridade prática do modelo hiperbólico reside em sua simplicidade, estabilidade dos parâmetros e coerência com os mecanismos esperados de transferência de massa em materiais vegetais.

4.5. CONCLUSÕES

Considerando os objetivos propostos para este capítulo de determinar a curva de secagem das drupas de *S. terebinthifolia* e realizar o ajuste de modelos matemáticos aos dados experimentais, conclui-se:

- O modelo hiperbólico demonstrou maior precisão estatística, explicando aproximadamente 98% da variabilidade do teor de umidade e 95% da redução da massa das drupas de *S. terebinthifolia* ao longo do período experimental.
- Com base na cinética observada, a taxa de remoção de umidade foi de $0,0421\%h^{-1}$ e o tempo de 48 horas foi estabelecido como o período ideal para a secagem das drupas de *S. terebinthifolia*, atingindo um equilíbrio higroscópico com umidade residual ($U = 1,9\%$)
- Em termos práticos, esses achados contribuem para a padronização de procedimentos de secagem em frutos de espécies florestais, podendo servir de protocolo no manejo pós-colheita, principalmente aquelas destinadas aos programas de restauração ecológica e conservação de germoplasma, proporcionando maior controle experimental e reprodutibilidade dos processos, assegurando a estabilidade microbiológica.

4.6. REFERÊNCIAS

- Anzanello, M. J., & Fogliatto, F. S. (2007). Curvas de aprendizado: estado da arte e perspectivas de pesquisa. *Gestão & Produção*, 14(1), 109–123. <https://doi.org/10.1590/S0104-530X2007000100010>
- Aranha, A., Defendi, R., & Jorge, L. (2022). Modelagem de secagem convencional e intermitente de produtos agrícolas: Uma revisão. *Journal of Food Process Engineering*, 45(11), e14206. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14206>
- Ataides, I. M. R., Oliveira, D. E. C. De, Ferreira Junior, W. N., Resende, O., Quequeto, W. D., & Romani, V. P. (2023). Fitting of mathematical models in the drying of araticum *Annona crassiflora* seeds. *Food Science and Technology*, 43. <https://doi.org/10.5327/fst.26323>
- Avhad, M. R., & Marchetti, J. M. (2016). Mathematical modelling of drying kinetics of Hass avocado seeds. *Industrial Crops and Products*, 91, 76-87. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.06.035>
- Beck, H. E., Zimmermann, N. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., & Wood, E. F. (2018). Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data*, 5(1), 180214. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214>
- Berjak, P., & Pammenter, N. W. (2008). From *Avicennia* to *Zizania*: Seed recalcitrance in perspective. *Annals of Botany*, 101(2), 213–228. <https://doi.org/10.1093/aob/mcm168>
- Bierhals, D. F., Henzel, A. B. D., Guarino, E. S. G., Cunha, H. N., Miura, A. K., & Oliveira, I. H. S. (2020). Espécies arbóreas nativas plantadas por agricultores agroflorestais no extremo sul do Brasil. *Cadernos de Agroecologia*, 15(2), Artigo 12848. <https://cadernos.agroecologia.org.br/cadernos/article/view/12848>
- Brasil. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. (2009). *Programas nacionais de saúde animal do Brasil*. Secretaria de Defesa Agropecuária; Departamento de Saúde Animal; MAPA/SDA/DSA. <https://www.gov.br/agricultura/pt-br>
- Brasil. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. (2009). Regras para análise de sementes.

- Canal, G. B., Alexandre, R. S., Silva Júnior, A. L., Guilhen, J. H. S., Caiafa, K. F., Ferreira, M. F. S., & Ferreira, A. (2025). Modelagem morfológica e colorimétrica para determinação de estádios de maturação de frutos de *Euterpe edulis*. *Revista Árvore*, 50(1). <https://doi.org/10.53661/1806-9088202650263881>
- Canavan, K., Magengelele, N. L., Paterson, I. D., Williams, D. A., & Martin, G. D. (2022). Uncovering the phylogeography of *Schinus terebinthifolia* in South Africa to guide biological control. *AoB PLANTS*, 14(1), Article plab078. <https://doi.org/10.1093/aobpla/plab078>
- Carmello-Guerreiro, S. M., & Paoli, A. A. S. (1999). Morfologia e anatomia da semente de *Schinus terebinthifolius* Raddi (Anacardiaceae) em desenvolvimento. *Revista Brasileira de Botânica*, 22(1), 91–98. <https://doi.org/10.1590/S0100-84041999000100012>
- Carvalho, P. E. R. (1994). *Espécies florestais brasileiras: Recomendações silviculturais, potencialidades e uso da madeira*. Embrapa-CNPq; SPI. <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/311691>
- Draper, N. R., & Smith, H. (1998). *Applied regression analysis*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118625590>
- Ferreira Junior, W. N., Resende, O., Pinheiro, G. K. I., Silva, L. C. de M., Souza, D. G., & Sousa, K. A. de. (2021). Modeling and thermodynamic properties of the drying of tamarind *Tamarindus indica* L. seeds. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 25(1), 37–43. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v25n1p37-43>
- Gebre, G. G., Keneni, Y. G., Gebremariam, S. N., & Marchetti, J. M. (2024). Drying kinetics and mathematical modeling of seeds of two mango varieties at different temperatures and with different pre-treatments. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 18(4), 1083–1101. <https://doi.org/10.1002/bbb.2611>
- Gomes, W. D., & Barbedo, C. J. (2024). Storage potential of *Eugenia uniflora* Lam. seeds incubated in different osmotic solutions and temperatures. *Journal of Seed Science*, 46. ?????? faltam dados <https://doi.org/10.1590/2317-1545v46283430>

- Goneli, A. L. D., Vieira, M. C., Da Cruz Benítez Vilhasanti, H., & Gonçalves, A. A. (2014). Modelagem matemática e difusividade eficaz de folhas de aroeira durante a secagem. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 44(1), 56–64. <https://doi.org/10.1590/s1983-40632014000100005>
- Governici, J. L., Sperotto, N. C. Z., Melo, E. de C., Gonzaga, D. A., & Carneiro, A. P. S. (2020). Drying and essential oil extraction of Brazilian peppertree *Schinus terebinthifolius* Raddi fruits. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 24(9), 637–643. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v24n9p637-643>
- He, C., Wang, H., Yang, Y., Huang, Y., Zhang, X., Arowo, M., Ye, J., Zhang, N., & Xiao, M. (2021). Comportamento de secagem e cinética do processo de secagem de cápsulas entéricas duras à base de plantas. *Pharmaceutics*, 13(3), 335. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics13030335>
- Hocking, P. J., Keerthisinghe, G., Smith, F. W., & Randall, P. J. (1997). Comparison of the ability of different crop species to access poorly-available soil phosphorus. Em *Plant nutrition for sustainable food production and environment: Proceedings of the XIII International Plant Nutrition Colloquium, 13–19 September 1997, Tokyo, Japan* (pp. 305–308). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-009-0047-9_48
- Hong, T. D., & Ellis, R. H. (1996). *A protocol to determine seed storage behaviour* (Technical Bulletin No. 1). IPGRI. https://cropgenebank.sgrp.cgiar.org/images/file/learning_materials/technical_bulletins_1.pdf
- Ji, J., Bie, Y., Zeng, Z., & Wang, L. (2022). Trip energy consumption estimation for electric buses. *Communications in Transportation Research*, 2, 100069. <https://doi.org/10.1016/j.commtr.2022.100069>
- Keneni, Y. G., Hvoslef-Eide, A. K. (Trine), & Marchetti, J. M. (2019). Mathematical modelling of the drying kinetics of *Jatropha curcas* L. seeds. *Industrial Crops and Products*, 132, 12–20. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.02.012>
- Lenzi, M., & Orth, A. I. (2004). Caracterização funcional do sistema reprodutivo da aroeira-vermelha (*Schinus terebinthifolius* Raddi), em Florianópolis-SC, Brasil. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 26(2), 198–201. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612004000200002>

- Liang, X., Yu, W., Qin, L., Wang, J., Jia, P., Liu, Q., Lei, X., & Yang, M. (2025). Stem and leaf segmentation and phenotypic parameter extraction of tomato seedlings based on 3D point cloud. *Agronomy*, 15(1), 120. <https://doi.org/10.3390/agronomy15010120>
- Magengelele, N., & Martin, G. (2023). Distribution and impact of the native South African wasp, *Megastigmus transvaalensis* (Hussey, 1956) (Hymenoptera: Torymidae) on the invasive *Schinus terebinthifolia* Raddi (Anacardiaceae) in South Africa. *African Entomology*, 31. <https://doi.org/10.17159/2254-8854/2023/a13583>
- Marilia Shibata, Jenny Paola Corredor-Prado, & Luciana Magda de Oliveira. (2019). Germinação e condutividade elétrica de sementes de *Schinus terebinthifolius* (Anacardiaceae). *Acta Biológica Catarinense*, 6(3), 98–105. <https://doi.org/10.21726/abc.v6i3.238>
- Nery, M. C., Davide, A. C., Silva, E. A. A. da, Soares, G. C. M., & Nery, F. C. (2014). Classificação fisiológica de sementes florestais quanto a tolerância à dessecação e ao armazenamento. *CERNE*, 20(3), 477–483. <https://doi.org/10.1590/01047760201420031450>
- Neves, E. J. M., Ventura, J. A., Kuster, R. M., Gomes, J. B. V., Santos, A. M., Ruas, F. G., & Gerhardt, N. S. (2018). *Estádios de maturação e qualidade dos frutos da aroeira* (Circular Técnica No. 317). Embrapa Florestas. <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1101915>
- Noguera, A., & Iturgaiz, I. (2023). Determinação experimental do teor de umidade de pseudo-equilíbrio dinâmico: um limite prático para o processo de secagem. *MethodsX*, 11, 102410. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2023.102410>
- Oliveira, F. de T. G. de, Vitória, R. Z. da, Posse, S. C. P., Arantes, S. D., Schmildt, O., Viana, A., Malikouski, R. G., & Barros, B. L. A. (2018a). Physiological quality of aroeira seeds under the storage conditions. *Nucleus*, 15(2), 567–574. <https://doi.org/10.3738/1982.2278.2959>
- Pacheco, M. V., Silva, C. S., Silveira, T. M. T., Hölbis, L. S., Harter, F. S., & Villela, F. A. (2011). Physiological quality evaluation of the *Schinus terebinthifolius* Raddi seeds. *Revista Brasileira de Sementes*, 33(4), 762–767. <https://doi.org/10.1590/S0101-31222011000400018>

- Panetta, F. D., & McKee, J. (1997). Recruitment of the invasive ornamental, *Schinus terebinthifolius*, is dependent upon frugivores. *Australian Journal of Ecology*, 22(4), 432–438. <https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.1997.tb00694.x>
- Peleg, M. (2022). Empirical models of sigmoid and non-sigmoid moisture sorption and hydration curves. *Food Engineering Reviews*, 15, 15–23. <https://doi.org/10.1007/s12393-022-09328-w>
- Physics-based Green-Ampt model in polar coordinate system predicting soil water transport in moistube irrigation: Comparison of physical, semi-physical-empirical, and numerical models under different working pressures. *Agronomy*, 14(12), 2839. <https://doi.org/10.3390/agronomy14122839>
- Rawlings, J. O., Pantula, S. G., & Dickey, D. A. (1998). *Applied regression analysis: A research tool* (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/b98890>
- Rurush, E., Alvarado, M., Flores, Y., Rojas, M., & Miano, A. (2021). Cinética de secagem da polpa de mirtilo e parâmetros de transferência de massa: Efeito da secagem por ar quente e janela de refração em diferentes temperaturas. *Journal of Food Engineering*, 314, 110929. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110929>
- Salomão, A. N., Medeiros, A. C. S., & Eira, M. T. S. (2006). *Comportamento fisiológico, secagem e armazenamento de sementes florestais nativas* (Circular Técnica No. 127). Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia. <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/294209>
- Sánchez-Bayo, F. (2021). Indirect effect of pesticides on insects and other arthropods. *Toxics*, 9(8), 177. <https://doi.org/10.3390/toxics9080177>
- Silva, M. C. C. da Nakagawa, J., & Figliolia, M. B. (2001). Influência da temperatura, da luz e do teor de água na germinação de sementes de aroeira-vermelha *Schinus Terebinthifolius* Raddi (Anacardiaceae). *Revista do Instituto Florestal*, 13(2), 135–146. <https://doi.org/10.24278/2178-5031.2001132637>
- Siqueira, V. C., Resende, O., & Chaves, T. H. (2012). Drying kinetics of *Jatropha* seeds. *Revista Ceres*, 59(2), 171–177. <https://doi.org/10.1590/S0034-737X2012000200004>

- Srivastava, P. K., & Sit, N. (2024). Mathematical and ANN modelling for convective drying of spanish cherry seeds: bioactive degradation, energy efficiency, and mass transfer evaluation. *Food Biophysics*, 20(1), 12. <https://doi.org/10.1007/s11483-024-09898-8>
- Vitória, R. Z., Oliveira, F. T. G., Posse, S. C. P., Arantes, S. D., Schmildt, O., Viana, A., Malikouski, R. G., & Barros, B. L. A. (2018). Physiological quality seeds aroeira depending on the maturity of fruit under different germination temperatures. *Nucleus*, 15(2), 575–582. <https://doi.org/10.3738/1982.2278.2870>
- Walters, C., & Pence, V. C. (2021). The unique role of seed banking and cryobiotechnologies in plant conservation. *PLANTS, PEOPLE, PLANET*, 3(1), 83–91. <https://doi.org/10.1002/ppp3.10121>
- Wang, C., Zhang, Q., Zhao, S., Qian, J., Li, Q., Ye, J., Chen, X., Kurexi, W., Huang, M., & Zhang, Z. (2024).
- Walters, C., & Pence, V. C. (2021). The unique role of seed banking and cryobiotechnologies in plant conservation. *Plants, People, Planet*, 3(1), 83–91. <https://doi.org/10.1002/ppp3.10121>
- Wang, C., Zhang, Q., Zhao, S., Qian, J., Li, Q., Ye, J., Chen, X., Kurexi, W., Huang, M., & Zhang, Z. (2024). Physics-based Green-Ampt model in polar coordinate system predicting soil water transport in moistube irrigation: Comparison of physical, semi-physical-empirical, and numerical models under different working pressures. *Agronomy*, 14(12), 2839. <https://doi.org/10.3390/agronomy14122839>
- Wang, X., Shen, J., Fan, L., & Cai, J. (2024). Analysis of the relationship between groundwater dynamics and soil water and salt changes under underground pipe salt drainage technology. *Water*, 16(24), 3597. <https://doi.org/10.3390/w16243597>
- Yun, J., Kim, S., & Kim, J. (2024). Digital twin technology in the gas industry: a comparative simulation study. *Sustainability*, 16(14), 5864. <https://doi.org/10.3390/su16145864>
- Zhang, M. J., Wang, Y. Z., Xian, Y., Cui, C. C., Xie, X. M., Tong, B. Q., & Han, B. (2023). Desiccation sensitivity characteristics and low-temperature storage of recalcitrant *Quercus variabilis* seed. *Forests*, 14(9), 1837. <https://doi.org/10.3390/f14091837>

CAPITULO III - Estimativa da produtividade de *Schinus terebinthifolia* (Sapindales: Anacardiaceae)

RESUMO

A estimativa da produtividade de sementes de espécies arbóreas nativas desempenha importante papel no planejamento agrícola, conservação da biodiversidade e gestão econômica, como por exemplo, para *Schinus terebinthifolia* Raddi, 1820 (Sapindales: Anacardiaceae), conhecida por seu elevado valor econômico no mercado nacional e internacional de especiarias. O objetivo desse estudo foi estimar a produtividade de drupas de *S. terebinthifolia* no campo. Dezesesseis plantas dessa espécie foram selecionadas aleatoriamente em cinco fragmentos da floresta estacional semidecidual. Dados biométricos das plantas como, área da copa (Acopa), diâmetro à altura do peito (DAP), altura total (Ht) e realizou-se o censo da produção mediante a colheita integral das drupas maduras, aferido o teor de umidade das drupas a fim de determinar a produtividade (P). Adicionalmente, foram avaliadas as variáveis de efeito misto (Tipo de formação florestal (Tipologia da Mata:TM) e variável biológica (Parasitismo médio: P_médio), O uso de PC1 (vigor da planta) ($p = 0,0204$, $R^2_{adj} = 0,27$), indicou que a produtividade foi impulsionada pelo vigor vegetativo de *S. terebinthifolia*, eliminando a multicolinearidade e erro residual, consolidando-se como indicador confiável para a produtividade frente as variáveis isoladas ($p > 0,05$.) A taxa de parasitismo médio (P_médio) não apresentou influência linear direta significativa na amostra estudada. A integração de técnicas multivariadas foi importante para garantir a confiabilidade de estimativas biométricas em cenários de alta complexidade e baixa densidade amostral ($n = 16$).

Palavras-chave: dendrometria; modelagem; PCA; parasitismo; pimenta-rosa.

ABSTRACT

Estimating the seed yield of native tree species plays a critical role in agricultural planning, biodiversity conservation, and economic management such as for *Schinus terebinthifolia* Raddi, 1820 (Sapindales: Anacardiaceae), a species renowned for its high economic value in both national and international spice markets. This study aimed to estimate the field drupe yield of *S. terebinthifolia*. Sixteen trees were randomly selected across five fragments of a seasonal semideciduous forest. Biometric data, including canopy area (Acanopy),

diameter at breast height (DBH), and total height (Ht), were recorded. A total production census was conducted through the complete harvesting of mature drupas, and their moisture content was measured to determine final yield (Y). Additionally, mixed-effect variables forest formation type (of the Dendrometric Variables: FT)) and biological variables (mean parasitism rate: P_mean) were evaluated. The use of PC1 (plant vigor) ($p = 0.0204$, $R^2_{adj} = 0.27$) indicated that yield was driven by the vegetative vigor of *S. terebinthifolia*. This approach eliminated multicollinearity and residual error, consolidating PC1 as a reliable predictor of yield compared to isolated variables ($p > 0.05$). The mean parasitism rate (P_mean) showed no significant direct linear influence on the studied sample. Combining multivariate techniques proved essential to ensure the reliability of biometric estimations in scenarios of high complexity and low sample size ($N = 16$).

Keywords: dendrometry; modeling; PCA; parasitism; pink peppercorn.

5.1. INTRODUÇÃO

Estimar a produtividade de frutos de espécies arbóreas tem sido tarefa desafiadora e requer aplicação de métodos estatísticos (Triboni & Barbosa, 2004). Ainda assim, o crescimento e desenvolvimento de uma árvore frutífera podem ter influência de características fenotípicas e específicas da espécie (Souza et al. 2013), que impactam diretamente na produtividade e afetam a quantidade e qualidade dos seus frutos.

Schinus terebinthifolia Raddi, 1820 (Sapindales: Anacardiaceae) trata-se de espécie nativa do Brasil (Cuda, et al. 2018; Martin et al. 2020; Barraqui et al. 2023), com ocorrência natural desde Pernambuco até o Rio Grande do Sul (Oliveira et al. 2018). Recentemente essa espécie foi reconhecida globalmente pela agressividade em áreas onde foi introduzida, como na Florida (EUA), e é considerada ameaça à biodiversidade devido ao seu rápido crescimento e alta competitividade (McKay et al. 2019; Cuda et al. 2022).

No Brasil, o maior produtor comercial dessa espécie é o Espírito Santo (Incaper 2016; Ruas et al. 2021; Silveira et al. 2021), especialmente nas comunidades extrativistas da região de São Mateus, São Miguel e Baixo São Francisco (Souza et al. 2013; Oliveira et al. 2018; Ruas et al. 2021; Barraqui et al. 2023). Nessas regiões, *S. terebinthifolia* se destaca como importante fonte de renda para muitas famílias (Silveira et al. 2021). Além disso, essa planta é utilizada em projetos de arborização urbana, recuperação de áreas degradadas e uso medicinal tradicional (Maciel et al. 2019; Martins et al. 2021; Velasques et al. 2021; Bezerra, 2022; Zangalli et al. 2022), razões pelas quais a capacidade produtiva de sementes passa ser importante (Ruas et al. 2021).

Mesmo diante da relevância econômica e das diversas aplicações de *S. terebinthifolia* em diversos setores, ainda assim existem poucos estudos quantificando a capacidade produtiva no campo. Pesquisas desta natureza, poderiam fornecer importantes informações para entender o potencial comercial, sua contribuição no banco de sementes e na restauração ambiental. Com o intuito de obter estimativas mais precisas acerca da produção de frutos, deve-se realizar levantamentos de dados em anos diferentes e períodos de forma a fornecer um subsídio sobre o potencial produtivo (Souza et al. 2013).

A presente preocupação reside na falta de literatura adequada para sustentação científica, pois, estudos anteriores focaram em aspectos morfológicos, controle biológico, fenologia foliar, produção de mudas em viveiro e ecológicos (Hogg et al. 2020; Alonso et al. 2022; Barraqui et al. 2023; Harlow et al. 2023; Santos et al. 2024; Daa Silva et al. 2025), porém, pouco se investigou sobre a relação entre variáveis dendrométricas e a produtividade da planta (Souza et al. 2013), com modelos estatísticos que os relacionam.

Notável por sua alta capacidade de se desenvolver em diferentes ambientes, *S. terebinthifolia* também se destaca pela elevada produção anual de sementes (Cuda et al. 2002; Spector & Putz, 2006; Medeiros et al. 2008; Cruz et al. 2014; Velásquez et al. 2021), com início da frutificação logo no primeiro ano de vida (Cruz et al. 2014). Estima-se que a produção anual média seja entre 0,22 e 3,5 kg de drupas por planta adulta de *S. terebinthifolia* por florada (Bierhals et al. 2020; Cruz et al. 2014; Gomes et al. 2013). Já em cultivo comercial com idade entre 3 e 5 anos, essa espécie produz de 3 a 8 kg de sementes/ano/planta, podendo alcançar até 20 kg aos 7 anos quando cultivada sobre boas práticas (Incaper, 2016).

A variação na produtividade de *S. terebinthifolia* pode estar relacionada a fatores bióticos e abióticos (Wyckoff & Clark, 2005), com destaque para procedência genética, diâmetro à altura do peito, altura das árvores, idade e área da copa, além da presença de pragas que poderiam impactar negativamente o rendimento da planta no campo (Incaper, 2016; Santos et al. 2014; Favarin et al. 2002; De Souza Oliveira et al. 2019).

A produtividade de espécies arbóreas nativas pode ser afetada pela presença de insetos praga com herbivoria causando alterações ecológicas e uma das preocupações são os insetos praga exóticos ou invasores, pois, competem com as espécies nativas podendo alterar a estrutura das comunidades e impactar no estabelecimento dos inimigos naturais (Kenis et al. 2008; Fortuna et al. 2022), como relatado para vespa exótica *Megastigmus transvaalensis* Hussey, 1956 (Hymenoptera: Torymidae) que danifica drupas de *S. terebinthifolia* (Wheeler, Massey & Endries 2001; Habeck, Bennett, & Grissell, 1989; Ferreira-Filho et al. 2015; Filazzola et al. 2021) tornando ameaça potencial e já observada em campo com altas taxas de parasitismo nessa planta nativa (Santos et al. 2017; Ghiotto et al. 2019). As larvas desse inseto consomem o embrião e o endosperma da semente, causando não apenas a perda da viabilidade germinativa, mas também a

redução no peso seco das drupas e abordamento precoce de frutos, o que compromete o rendimento final (Habeck et al. 1989; Wheeler et al. 2001; Marchiori, 2023).

Dados morfométricos e dendrométricos também são utilizados na predição da produtividade de espécies arbóreas (Souza et al. 2013). O delineamento da área da copa (tamanho e estrutura) permite prever a produção primária de uma árvore (Freudenberg et al. 2022). O emprego de modelos com múltiplas variáveis tem avançado na predição de atributos dendrométricos, como diâmetro e biomassa acima de solo. Tais modelos de regressão integram parâmetros extraídos por sensoriamento remoto a dados de inventário (Dalponte et al. 2018; Conti et al. 2019; Jilo et al. 2025), fornecendo soluções eficazes para tratamento de conjuntos complexos de variáveis independentes (Sun et al. 2023).

Ajustar modelos biológicos, especialmente com dados de produtividade de frutos de espécies como *S. terebinthifolia* torna-se um grande desafio devido à alta variabilidade natural e às interações complexas. Modelos que incorporam a realidade biológica ao princípio da parcimônia são necessários para equilibrar a complexidade das variáveis e a aplicabilidade prática das estimativas da produtividade (Hammer et al. 2019).

A regressão múltipla aparece como ferramenta muito importante no desenvolvimento destes tipos de análises, permitindo a produção de conclusões mais precisas quando se lida com muitas variáveis independentes, podendo ser aplicada de forma linear, não linear ou logística multinomial (Grant et al. 2018; Sun et al. 2023). A falta de modelos preditivos bem embasados limita a capacidade do manejo sustentável de *S. terebinthifolia* em plantios comerciais e como solução para tratar com a complexidade desses dados, pode ser o emprego de métodos multivariados e modelos de regressão avançados (Zhu et al. 2023).

A aplicação da Análise de Componentes Principais (PCA), pode permitir sintetizar variáveis altamente correlacionadas, como por exemplo, o DAP e área da copa, em variáveis não observadas de vigor vegetativo, evitando problemas de multicolinearidade nos modelos preditivos (Dalponte et al. 2018; Sun et al. 2023).

Geralmente, esses modelos integram realidades biológicas e parcimônias estatísticas que são importantes para equilibrar a complexidade das interações inseto-planta (Hamer et al. 2019; Riossi et al. 2020). Neste contexto, considerando a importância econômica, ecológica e social de

S. terebenthifolia, o objetivo desse estudo foi estimar a produtividade dessa planta com base em dados dendrométricos e verificar se é mais influenciada pelo crescimento vegetativo natural ou pela pressão do parasitismo por *M. transvaalensis*.

5.2. MATERIAL E MÉTODOS

5.2.1. Área de estudo

O estudo foi conduzido em área de preservação ecológica no *Campus* da Universidade Federal de São Carlos, em Sorocaba, São Paulo. A amostragem foi rerealizada em cinco fragmentos de floresta estacional semidecidual com indivíduos de *S. terebinthifolia*. A seleção aleatória dos indivíduos foi adotada para possibilitar a análise e compreensão da distribuição e características de *S. terebinthifolia* no campo.

5.2.2. Seleção da amostra

A estimativa da produtividade de *S. terebinthifolia* (P), foi limitada à seleção árvores com drupas maduras. Dezesesseis indivíduos de *S. terebinthifolia* produzindo foram identificados e georreferenciados dentro dos cinco fragmentos, sendo 1, 4 e 5 caracterizados como áreas abertas, sem vegetação, expostas diretamente à radiação solar, enquanto 2 e 3 áreas plantadas localizadas dentro da mata nativa (Anexo). As árvores apresentaram características semelhantes, porém com alturas diferentes, variação na idade, compreendendo aproximadamente 4 a 13 anos (dados não publicados) e sem receber qualquer tratamento referente a adubação.

5.2.3. Coleta de dados

A coleta das drupas de *S. terebinthifolia* foi realizada de maio a junho de 2024, com tesoura de poda e corte somente da panícula que continha preferencialmente drupas maduras, caracterizadas pela coloração avermelhada (Bierhals et al. 2020), com 100% dos frutos maduros coletados, enquanto os verdes permaneceram na árvore para contribuir com o banco de sementes. Desuniformidade nos estágios de maturação das drupas foi observado no campo, na mesma panícula (Neves et al. 2018) e a seleção realizada durante o beneficiamento no laboratório foi necessária.

Os dados dendrométricos das árvores foram coletados, com a mensuração das seguintes variáveis, diâmetro à altura do peito (*DAP* em cm) (eq.2), a uma distância a 1,3 m acima do solo, altura total (*Ht* em m), distância linear entre o solo até ao topo das árvores (Sanquetta et al. 2009). A altura da árvore foi determinada com bastão graduado tendo em consideração o plano cartesiano (Figura 26).

As coordenadas dos pontos da copa x e y , foram anotadas com auxílio de um plano cartesiano, projetando as coordenadas extraídas na forma de um polígono irregular, com intuito de delimitar a área da copa, com a equação de *Gauss* conhecida como fórmula de *Shoelace* (Ochilbek, 2018; Stoeck, 2021) (eq. 03) para o cálculo da área (Figura 26). Os pontos da copa foram ordenados no sentido horário, considerando o eixo cartesiano dimensionado a partir das extremidades mais salientes (Figura 26). A taxa de parasitismo (TP em %) por *M. transvaalensis* nas drupas de *S. terebinthifolia* ao longo do ciclo de frutificação foi também determinada.

$$DAP = \frac{CAP}{\pi} \quad (\text{eq. 02})$$

$$A_{copa} = \frac{1}{2} |\sum_{i=1}^n (X_i Y_{i+1} - Y_i X_{i+1})| \quad (\text{eq.03})$$

Onde: DAP - diâmetro à altura do peito; A_{copa} - área da copa x e y são coordenadas dos pontos da copa; $(x_1; y_1), (x_2; y_2), (x_3; y_3) \in (x_n; y_n)$ são os vértices da copa, medidas em centímetros e N : número dos pontos marcados na copa.

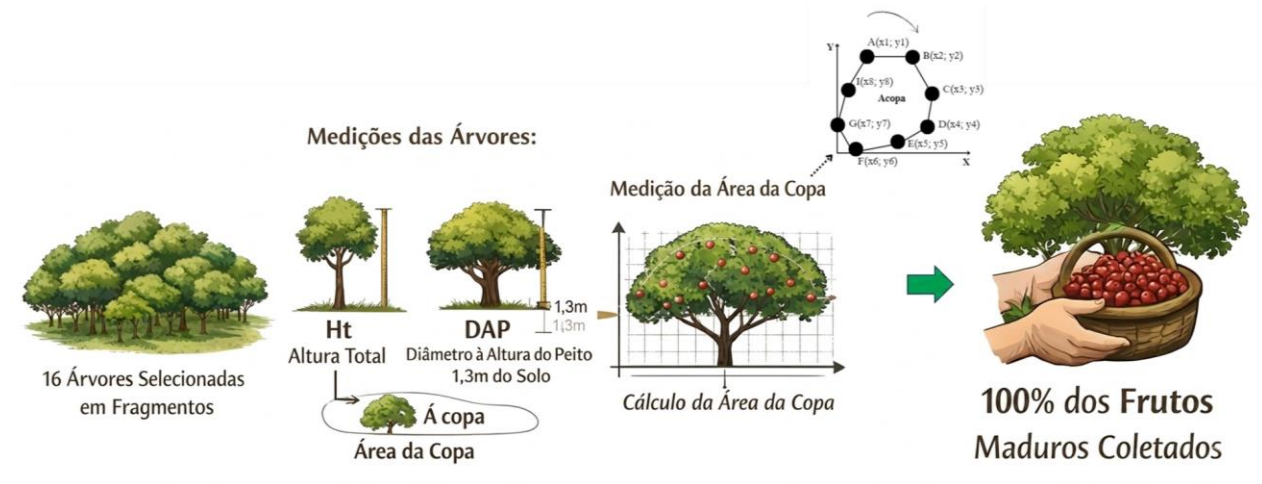


Figura 26 – Representação esquemática das variáveis dendrométricas medidas em campo para *S. terebinthifolia*, diâmetro a altura do peito (DAP); altura total da árvore (Ht); área da copa (Acopa) e produção (P). Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com auxílio da ferramenta Canva com suporte de inteligência artificial para aprimoramento visual, ChatGPT (OpenAI) e Gemini (Google).

A fim de simplificar a padronização analítica neste trabalho, adotou-se o termo produtividade (P) para designar a produção bruta da matéria seca (PBMS) individual dada em grama por árvore (g/ARV), obtida após a desidratação total dos frutos em estufa.

5.2.4. Procedimentos estatísticos

Análise da estatística descritiva dos dados coletados das variáveis dendrométricas foi realizada para aferir as características peculiares das matrizes através da comparação com testes estatísticos, considerando as variáveis quantitativas, exceto ao tipo de formação florestal (Tipologia da Mata: TM), que foi obtidas medidas de centralidade e dispersão. A normalidade dos resíduos, gráficos de correlação, transformação da variável resposta e testados modelos.

A modelagem da produtividade de *S. terebinthifolia*, assim como as variáveis preditivas área da copa (Acopa), diâmetro a altura do peito (DAP) e altura total da árvore (Ht), foram submetidos a uma análise exploratória com teste de Shapiro-Wilk, com nível de significância de 5%. Esse teste foi empregado para verificar se o conjunto de dados segue uma distribuição normal (Shapiro & Wilk, 1965). Análise visual com histogramas e curvas de densidade normal sobrepostas foi necessária, para verificar a aderência das variáveis à distribuição de *Gauss*. A padronização dos dados em Z-score foi realizada devido a natureza não normal de algumas variáveis (P e Ht) e prosseguir com Análise de Componentes Principais (PCA).

Análise de correlação foi realizada entre as variáveis: A_{copa} : área da copa (m^2). DAP : diâmetro a altura do peito (cm). H_t : altura total (m). P : produção bruta, TM: tipo de formação florestal (Tipologia da mata: aberto ou fechado), P0.30; P0.60; P0.90 e P0.120 (taxas de parasitismo aos 30, 60, 90 e 120 dias).

5.2.5. Ajuste de modelos

O ajuste do modelo de produtividade considerou as seguintes etapas: coleta, criação de banco de dados, pré-processamento dos dados (tratamento e análise bivariada), verificação dos pressupostos, seleção de variáveis independentes, parametrização, teste do modelo (Anexo 1), diagnóstico, inferência e ajuste.

Ao ajustar os modelos, levou-se em consideração o método de mínimos quadrados ordinários, e ao constatar presença de multicolinearidade, avaliada com Fator de Inflação da

Variância (VIF) que mediu o quanto a variância do coeficiente de regressão estimado foi aumentada devido à multicolinearidade entre as variáveis preditoras. Essencial na regressão múltipla, um VIF alto indica que a correlação entre variáveis independentes torna os estimadores instáveis e difíceis de interpretar.

5.2.6. Dominância do parasitismo sobre as variáveis dendrométricas

A variável taxa de parasitismo (TP) ao longo do período de avaliação (P0.30; P1.60; P0.90 e P0.120) foi introduzida no modelo para observar a influência sobre a produtividade, considerando a multicolinearidade e o valor médio da taxa de parasitismo (P_médio) ao longo dos dias após tratamento (DAT).

Parasitismo médio (P_médio) foi incluído como variável biótica única e ajustados os modelos de regressão linear múltipla considerando as variáveis dendrométricas nomeadamente: área de copa (Acopa), diâmetro a altura do peito (DAP) e altura total (Ht) como preditores da variável resposta produtividade (P). O parasitismo (P0.30; P0.60; P0.90 e P0.120) e tipo de formação florestal (TM) como variáveis com efeito misto. Adicionalmente, análise de componentes principais (PCA) foi realizada para redução de dimensionalidade, com o primeiro componente principal (PC1) como variável explicativa em modelos subsequentes. O primeiro componente principal (PC1) foi composto pela associação das variáveis de vigor (Acopa, DAP e Ht).

5.2.7. Critérios de avaliação dos modelos

A seleção do modelo ideal foi baseada no maior valor do coeficiente de determinação (R^2) (Yun et al. 2024), e menor valor do raiz do erro quadrático médio (RMSE) (Liang et al. 2025; Yun et al. 2024).

A significância dos coeficientes foi avaliada com análise estatística dos parâmetros estimados, e, o erro padrão residual de cada modelo utilizado como medida de qualidade de ajuste (Anexo 2). Gráficos de resíduos foram examinados com o objetivo de verificar a adequação dos modelos (Sanquetta, 2009).

A simplificação do modelo também foi verificada, tendo em consideração as variáveis que não contribuíram significativamente para o ajuste, removidas para testar a influência (Sun et

al. 2023), de forma a entender como cada variável independente (A_{copa} ; DAP ; H_t) contribuiu para a variável dependente ou resposta ($P = Y$), e estimou-se a relação entre as elas (Tabela 13).

Tabela 13 - Simplificação de modelos e hipóteses testadas

Modelos	Relação estimada	Variáveis excluídas	H ₀	H ₁
1	P e A_{copa}	DAP e H_t	$\beta_1 = 0$	$\beta_1 \neq 0$
2	P e DAP	A_{copa} e H_t	$\beta_2 = 0$	$\beta_2 \neq 0$
3	P e H_t	A_{copa} e DAP	$\beta_3 = 0$	$\beta_3 \neq 0$

H₀ - Hipótese nula. H₁- Hipótese alternativa. $H_0 : \beta_0 = 0$ ($\beta_1 = \beta_2 = \beta_3$), não há relação linear entre as duas variáveis a serem analisadas, isto é, nenhuma variável prediz significativamente a produtividade ($\beta_s \neq 0$), ou ainda que A_{copa} , DAP e H_t não explicam P (efeito não significativo). $P < 0.05$ rejeitou-se H_0 indicando que A_{copa} , DAP e H_t são significativos (tem efeitos sobre P). $P > 0.05$ aceitamos o H_1 , indicando que A_{copa} , DAP e H_t não são significativos (não tem efeito sobre P).

A presença de multicolinearidade entre as variáveis de crescimento foi monitorada devido ao tamanho amostral ($N = 16$), e aplicou-se que o VIF (Fator de Inflação da Variância), quando caso ocasionar instabilidade de convergência nos modelos complexos, onde tornou-se importante reduzir a dimensionalidade com a PCA.

A seleção do modelo final considerou critérios de parcimônia, significância de 5% e menor valor de AIC, selecionando-se a estrutura que utilizou o PC1 como regressor sintético do vigor vegetativo de *S. terebinthifolia* (A_{copa} , DAP e H_t) (Gwelo, 2019; Lang & Zou, 2020; Kyriazos & Poga, 2023; Wu et al. 2025). A adequação e estabilidade dos modelos foram verificadas com rigor da análise de resíduos de maneira a assegurar a confiabilidade das estimativas ao longo do tempo (Luo et al. 2021).

5.3. RESULTADOS

5.3.1 Estatística descritiva das variáveis dendrométricas das matrizes de *Schinus terebinthifolia*

Os valores de produtividade obtidos em campo mostraram ampla variabilidade das amostras, com amplitude entre 317,20 g e 2780,30 g (Tabela 14). Essa elevada variabilidade indica uma resposta heterogenia entre as unidades experimentais às condições de campo, possivelmente influenciada por variáveis ambientais ou bióticas.

A diferença observada entre a média e mediana em relação a produtividade (668,40g) aliada ao coeficiente de assimetria positivo (1,20) (Material suplementar), indicou distribuição de dados deslocada à direita, com pequena parcela de indivíduos (N = 6) com produtividade média (>790,71g) (Tabela 14, Figura 27). As variáveis preditivas variaram, com DAP de 2,06 a 12,00 cm e altura de 1,9 m a 9,10 m, enquanto o parasitismo mostrou incremento gradual ao longo do período, com valores elevados aos 120 DAT ($67,42 \pm 23,60\%$).

Tabela 14 - Estatística das variáveis dendrométricas, produção e taxa de parasitismo ao longo do período para *S. terebinthifolia*. Acopa: área da copa (m²). DAP: diâmetro a altura do peito (cm). Ht: altura total (m). P: produção de drupas por indivíduo analisado (g); TM: tipo de formação florestal (Tipologia da Mata). P0.30; P0.60; P0.90 e P0.120 (taxas de parasitismo aos 30, 60, 90 e 120 dias). 1° e 3° Q: primeiro e terceiro quartil. $\bar{x}$: média.

Variável	Mín - Max	1° Q	Mediana	3° Q	$\bar{x} \pm SD$
Acopa (m ²)	1,11- 20,87	3,29	7,62	9,477	7,49 $\pm$ 5,10
DAP (cm)	2,06 - 12,00	4,54	5,73	8,105	6,38 $\pm$ 2,75
Ht (m)	1,90 - 9,100	2,45	3,17	5,562	4,18 $\pm$ 2,29
P (g)	317,20 - 2780,30	410,60	668,40	1426,1	1031,90 $\pm$ 790,71
P0.30 (%)	26,60 - 85,33	48	60,67	75,67	60,08 $\pm$ 17,83
P0.60 (%)	21,33 – 86,67	34,33	46,67	56	47,33 $\pm$ 18,75
P0.90 (%)	34,67 – 96,00	47,33	64,00	83,33	65,33 $\pm$ 20,72
P0.120 (%)	25,33 – 98,67	49,67	72,0	83,33	67,42 $\pm$ 23,60
TM	1,00	1,0	1,00	1	1

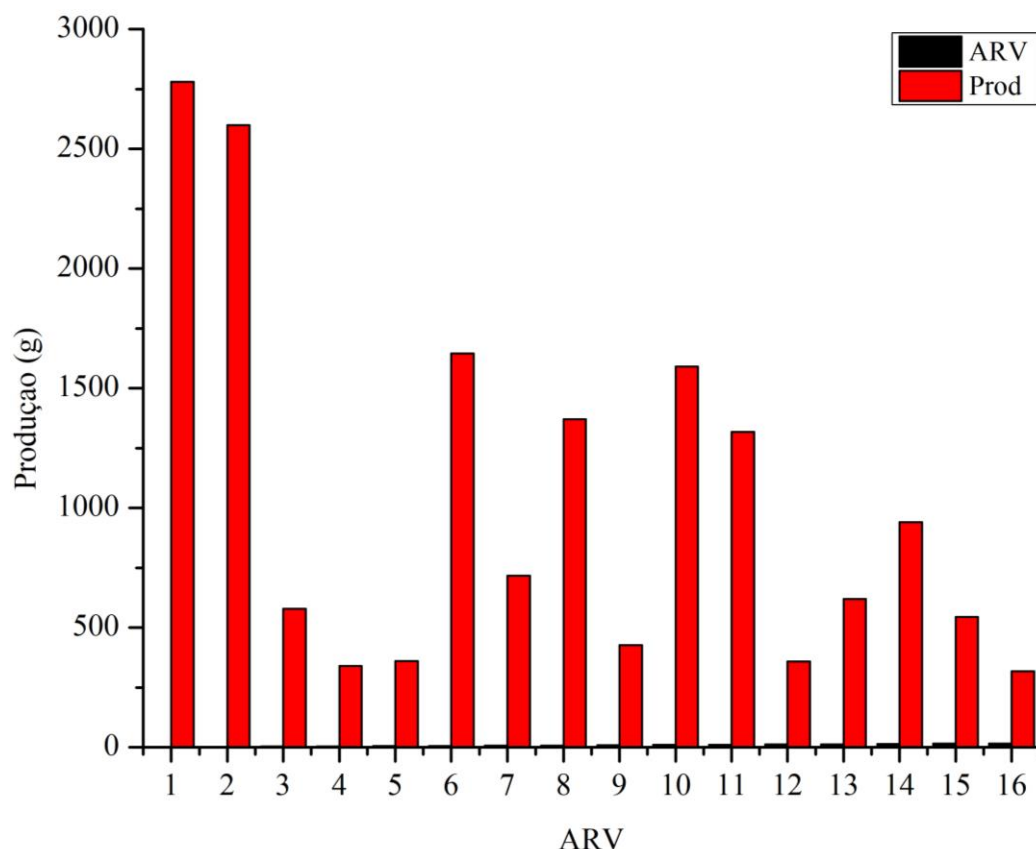


Figura 27 – Produção de drupas por cada indivíduo de *S. terebinthifolia* analisados em campo. ARV: Árvore (unidade experimental).

As variáveis DAP e Acopa, apresentaram comportamento próximo da normalidade ($p < 0,05$), enquanto a P e Ht evidenciaram assimetria ($p > 0,05$) (Figura 28). Conforme o teste de Shapiro-wilk as variáveis Acopa ($W = 0,91$; $p = 0,12$) (Figura 28A); DAP ($W = 0,96$; $p = 0,67$) (Figura 28C); mostrou aderência à normalidade com as frequências distribuídas em torno da média. Enquanto que, Ht ($W = 0,84$; $p = 0,01$) (Figura 28B) e P ($W = 0,82$; $p < 0,01$) (Figura 28 D), indicaram desvio significativo da distribuição normal, com assimetria positiva e com maior concentração de indivíduos em classes inferiores.

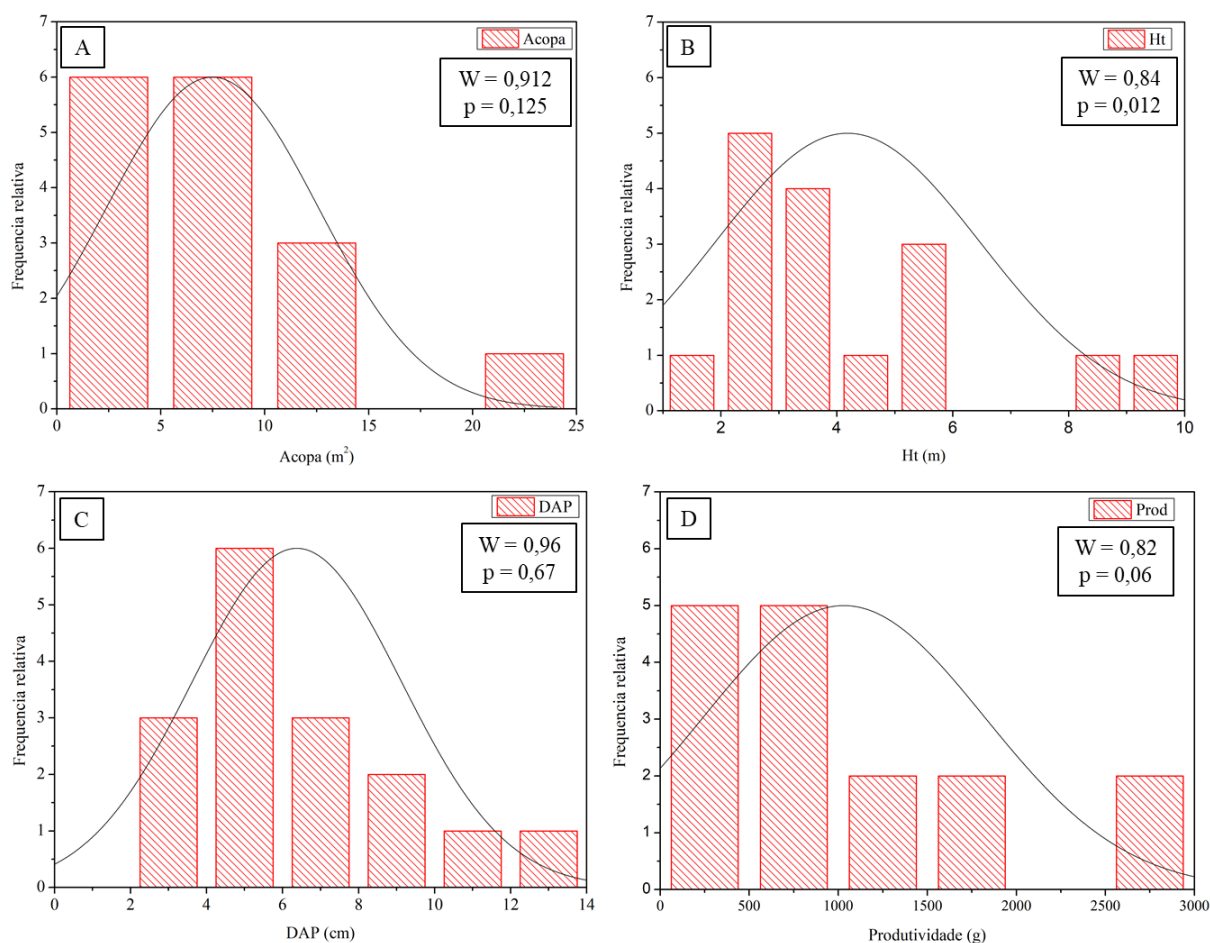


Figura 28 - Distribuição de frequências e teste de normalidade para as variáveis dendrométricas e produtivas de *S. terebinthifolia*. Produtividade (P), área da copa (Acopa); diâmetro a altura do peito (DAP) e altura total da árvore (Ht). Os valores de W e p referem -se ao teste de normalidade de Shapiro-wilk. A linha contínua representa a curva de gaussiana de distribuição teórica.

5.3.1. Matriz de correlação entre as variáveis dendrométricas

A não linearidade dos dados foi verificada e realizado a transformação para linearizar relações complexas e melhorar a capacidade preditiva do modelo, reduzindo a heterocedasticidade para permitir que o modelo capture melhor a realidade biológica do campo (Figura 29). A matriz de correlação do par de variáveis analisadas (Acopa, DAP, Ht, P, P0.30, P0.60; P0.90; P0.120 e TM), indicaram correlação moderada positiva entre DAP e P ($r = 0,570$), indicando maior produtividade para plantas de *S. terebinthifolia* com maior DAP e correlação positiva entre DAP e Ht ($r = 0,615$), indicando que árvores com maior DAP são mais altas. A

variável do efeito aleatório (TM) não influenciou no parasitismo, enquanto a variável P mostrou distribuição assimétrica, assim como o parasitismo aos 60 DAT apresentou correlação positiva moderada ($r = 0,50$) e aos 90 e 120 DAT correlação negativa com a P (Figura 29).

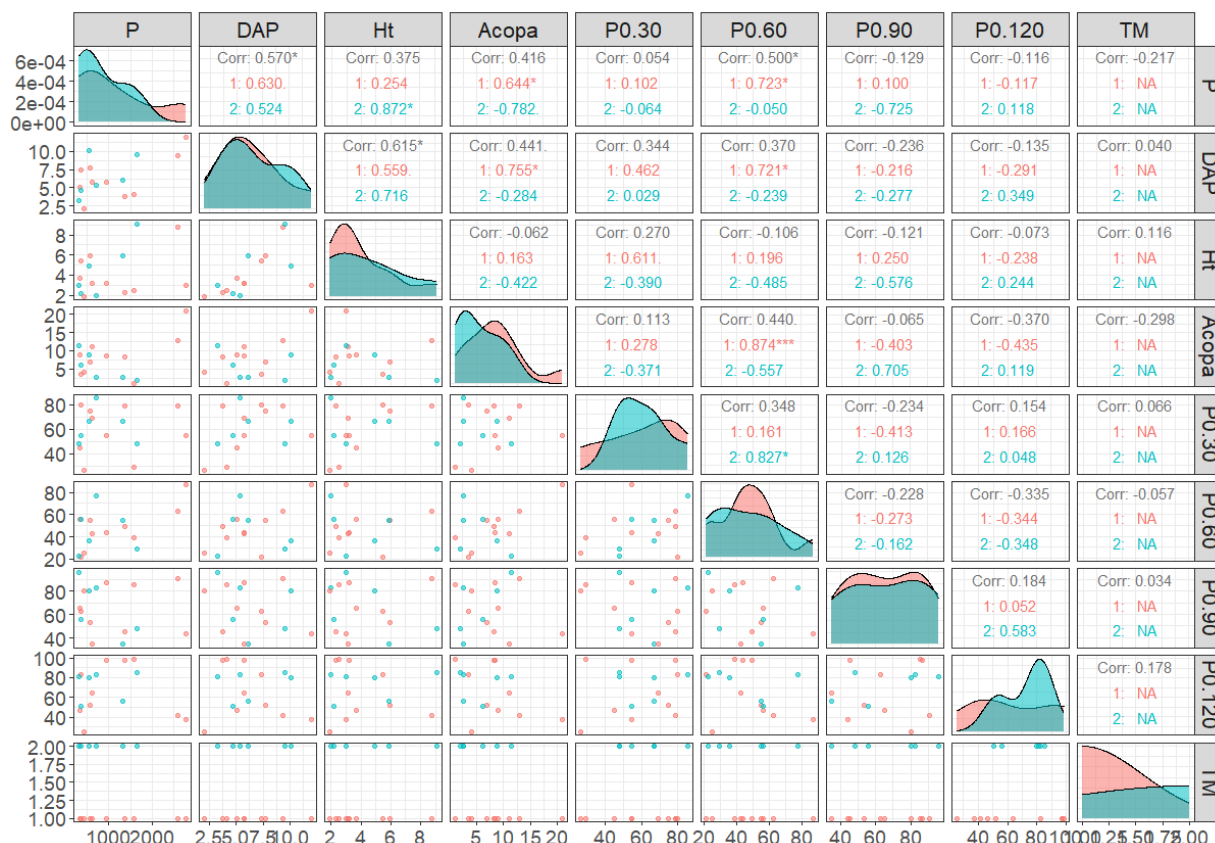


Figura 29 - Matriz de correlação entre as variáveis dendrométricas, bióticas e de efeito misto. Acopa: área da copa (m^2). DAP: diâmetro a altura do peito (cm). Ht: altura total (m). TM: tipo de mata (aberta ou fechada). P0.30; P0.60; P0.90 e P0.120 (taxas de parasitismo aos 30, 60, 90 e 120 dias). Cor cinza representa correlação geral considerando todos os dados juntos. A cor vermelha representa o coeficiente de correlação apenas para o grupo da formação florestal 1(mata aberta), enquanto a cor verde formação florestal 2 (mata fechada). (*) e (**) representam correlações significativas ($p < 0.05$ ou $p < 0.01$). Valores próximos a 1 indicam correlação positiva forte, e -1 correlação negativa forte.

A análise de regressão indicou existência de influência do diâmetro a altura do peito sobre a produtividade (DAP vs. P), que também ficou evidente com o gráfico de resíduos que mostrou uma distribuição aleatória, validando a homoscedasticidade e o ajuste do modelo para esta

relação. Por outro lado, a relação entre a taxa de parasitismo médio e a produtividade (P_Medio vs. P) apresentou elevada dispersão residual, com ausência de uma tendência clara do impacto da infestação sobre a produtividade na amostra analisada (Figura 30).

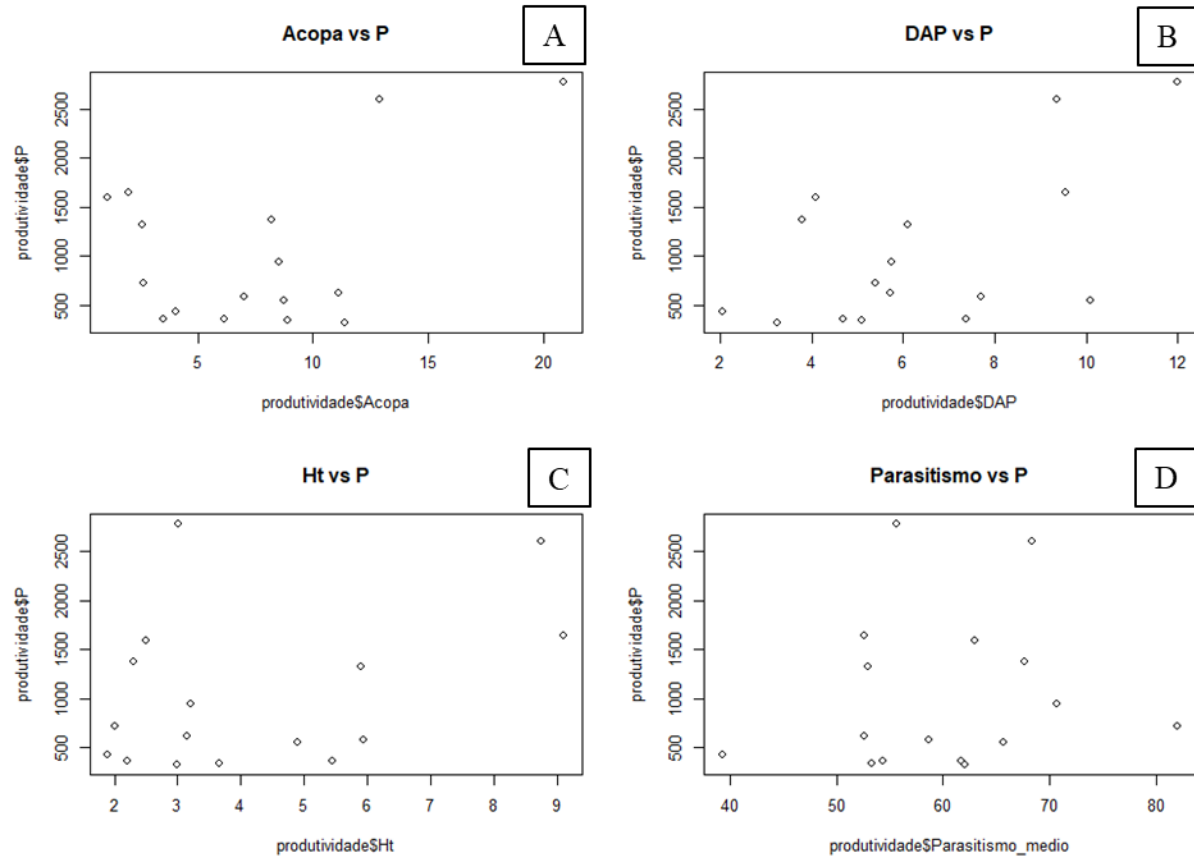


Figura 30 - Gráfico de dispersão de resíduos da produtividade (P) com as variáveis dendrométricas: da copa (Acopa), diâmetro a altura do peito DAP), e altura total (Ht) e taxa de parasitismo médio (P_médio) ao longo do período observado. A: Dispersão dos resíduos entre Acopa vs P. B: dispersão dos resíduos entre DAP vs P. C: Dispersão dos resíduos entre Ht vs P. D: Dispersão dos resíduos entre taxa de P_Médio vs P.

Associação entre a produtividade das drupas de *S. terebinthifolia* e taxa de parasitismo foi verificada ao longo do período de avaliação (30, 60, 90 e 120 dias), onde os valores dos coeficientes de determinação (R^2) foram baixos em todos os intervalos de tempo. O maior poder explicativo foi observado aos 60 DAT com apenas 25% dessa relação explicada ($r = 0,500$).

Enquanto para 90 e 120 DAT apresentou um poder explicativo residual inferior a 2% ($r = -0,129$ e $r = -0,116$) (Tabela 16).

Tabela 15 – Coeficientes de determinação (R^2) e correlação de *Pearson* (r) entre a taxa de parasitismo por *M. transvaalensis* e a produtividade de sementes de *S. terebinthifolia* em diferentes períodos de avaliação

DAT	R^2	r	Relação	Tendência
30	0,0029	0,054	Desprezível	Positiva
60	0,2504	0,500	Moderada	Positiva
90	0,0167	-0,129	Muito fraca	Negativa
120	0,0135	-0,116	Muito fraca	Negativa

Nota: R^2 : Coeficiente de determinação. r : Correlação de Pearson; DAT: dias após tratamento.

Portanto, fica evidente que a dispersão aleatória indica que o parasitismo não atuou como um limitante biológico predominante para a produção das drupas dessa planta, que essa mudança observada mostra efeito aleatório do parasitismo em estágios fenológicos mais avançados. Desta forma, os fatores como vigor vegetativo e as características dendrométricas consolidam-se como os verdadeiros determinantes da produtividade. A baixa capacidade preditiva, reforçou a aplicação da Análise de Componentes Principais (PCA), visando integrar as variáveis de vigor total (Acopa; DAP e Ht) para um entendimento mais abrangente dos fatores que influenciam a produtividade.

5.3.2 Diagnóstico de multicolinearidade (VIF)

Multicolinearidade perfeita e positiva ($p = 1$) entre as variáveis bióticas, taxa de parasitismo (P0.30; P0.60; P0.90 e P0.120) foi observada (Tabela 17), indicando progressão ao longo do tempo, justificando a unificação dessas variáveis para taxa de parasitismo médio (P_médio).

Tabela 16 - Matriz de correlação de *Person* entre as taxas de parasitismo ao longo do período de avaliação ($p < 0.001$).

Variável	P0.30	P0.60	P0.90	P0.120
P0.30	1,00			
P0.60	1,00	1,00		
P0.90	1,00	1,00	1,00	
P0.120	1,00	1,00	1,00	1,00

Nota: P0: taxas de parasitismo aos 30, 60, 90 e 120 dias após aplicação do tratamento.

Os valores do $VIF < 5$ (Tabela 18), ou seja, não há multicolinearidade que impeça ajustar o modelo de regressão, apesar das variáveis DAP e Ht apresentarem discrepâncias entre si, isto é, não há multicolinearidade problemática e desta forma elimina uma das causas clássicas de falha de modelo. O VIF calculado, mostrou que para a variável DAP teve efeito moderado (2,55), embora exista correlação entre DAP e Ht, porém não é preditiva ($VIF < 5$).

Tabela 17 - Diagnóstico de multicolinearidade e Fator de inflação de Variância (VIF) para variáveis independentes no modelo de produtividade.

Variável	VIF	Resultado
Acopa	1,59	Baixa correlação
DAP	2,55	Moderada
Ht	2,06	Moderada

Nota: DAP: diâmetro a altura do peito (cm); e Ht: altura total (m). $VIF < 5$ (ausência de colinearidade severa); $VIF=1$ (indica preditores ortogonais, ie, as variáveis independentes não tem nenhuma correlação entre si).

5.3.2. Definição do modelo final e estimativa dos parâmetros

Diante da ausência de significância das variáveis de parasitismo (P0.30; P0.60; P0.90 e P0.120) e tipo de formação florestal (TM), o modelo simplificado baseou-se na variável de vigor (Acopa,

DAP e Ht) que é dada por Primeiro Componente Principal (PC1), onde as estimativas são apresentadas na Tabela 18.

Tabela 18 - Coeficientes do modelo de regressão para estimativa da produtividade baseada no vigor (PC1). Modelo de regressão: $P \sim PC1 + P_medio + TM$, data = produtividade. P_Medio: taxa de parasitismo médio. TM: tipo de formação florestal (mata aberta ou fechada).

Variável	Estimativa	Erro padrão	Valor de t	Pr (> t)
Intercepto	934,764	1131,321	0,826	0,4248
PC1	-354,580	132,787	-2,670	0,0204*
P_Medio	9,729	17,870	0,544	0,5961
TM	-354,168	351,456	-1,008	0,3335

Notas: Códigos de significância: 0 ‘ ‘ 0,001 ‘ ‘ 0,01 ‘ ‘ 0,05 ‘ ‘ 0,1 ‘ ‘ 1. Erro padrão residual: 672,3 com 14 graus de liberdade. R² múltiplo: 0,3252; R² ajustado: 0,277. Estatística F: 6,746 em 1 e 14 GL; valor-p: 0,02109.

O ajuste do modelo baseado no PC1, evidenciou relação linear significativa ($p = 0,0204$) com a produtividade (Figura 31), confirmando que o vigor de *S. terebinthifolia* foi o principal preditor da produção de drupas, apresentando maior variância das variáveis dendrométricas (Figura 31A). A variável de efeito misto (TM) não foi significativa para os modelos testados. Portanto, a produtividade se mostrou associada a estrutura da planta (PC1), exercendo controle positivo sobre a produção (Figura 31 B).

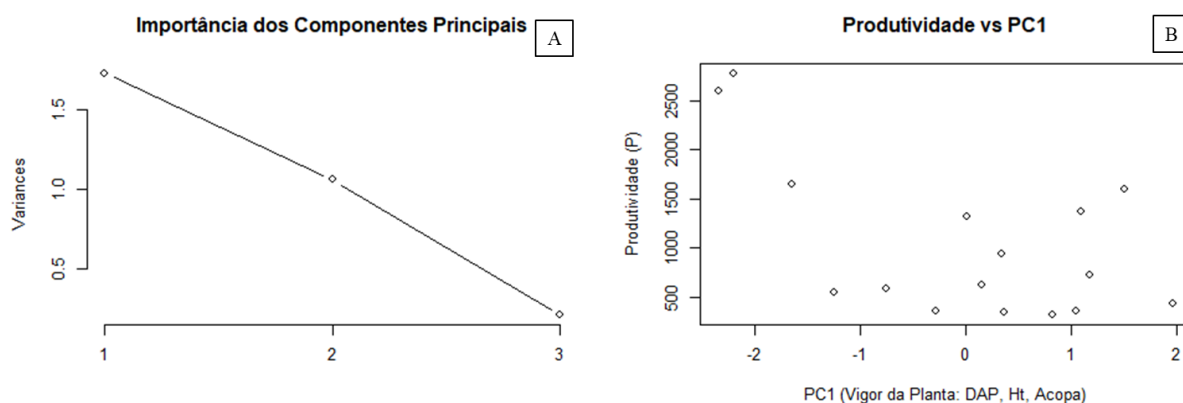


Figura 31 - Análise de Componentes Principais aplicada às variáveis dendrométrica. A: Gráfico de sedimentação (Scree Plot) indicando a variância explicada por componente. B: Dispersão da

produtividade em função do vigor vegetativo de *S. terebinthifolia* pelo primeiro componente principal (PC1). O PC: indica a combinação de Acopa, DAP e Ht. Os valores á esquerda (negativos), representam árvores de *S. terebinthifolia* de alto vigor (DAP e Ht). Valores á direita (positivos) representam árvores de *S. terebinthifolia* de menor porte.

O Biplot da PCA (Figura 32), permitiu a ordenação dos indivíduos em função do seu vigor vegetativo (índice composto que reflete o porte estrutural como Acopa, DAP e Ht). Indivíduos de *S. terebinthifolia* localizados na região de maior vigor do gráfico apresentaram os maiores patamares produtivos, o que permite validar o PC1, como o preditor estatisticamente significativo ($p < 0,05$) e mais robusto que as variáveis isoladas (Acopa, DAP e Ht).

A Acopa está projetada na mesma direção do eixo PC1 (negativo), indicando que a componente atua como índice de porte estrutural de *S. terebinthifolia*. Os indivíduos 1, 2, 6, e 15 se destacaram pelo maior desenvolvimento dendrométrico (Figura 32; Material suplementar). A sobreposição dos vetores para o DAP indicou que foi uma variável mais representativa para PC1, servindo como indicador do potencial produtivo de *S. terebinthifolia*, comprovada apartir da significância da relação entre PC1 e produtividade.

A variável Ht apresentou vetor com forte inclinação positiva no eixo PC2, distanciando do eixo horizontal. Embora Ht, contribua para o vigor da planta (PC1), ainda possui variabilidade específica que permite diferenciá-las (Figura 32). As árvores 6 e 11, localizadas no quadrante superior esquerdo, caracterizaram-se por um crescimento vertical mais acentuado em relação a Acopa (Figura 32). Correlação entre o ângulo formado por Ht e DAP que é menor que o formado entre Ht e Acopa também foi observado, indicando que árvores com maior diâmetro tendem a ser mais altas, porém, nem sempre as mais altas tem maior copa e vice-versa.

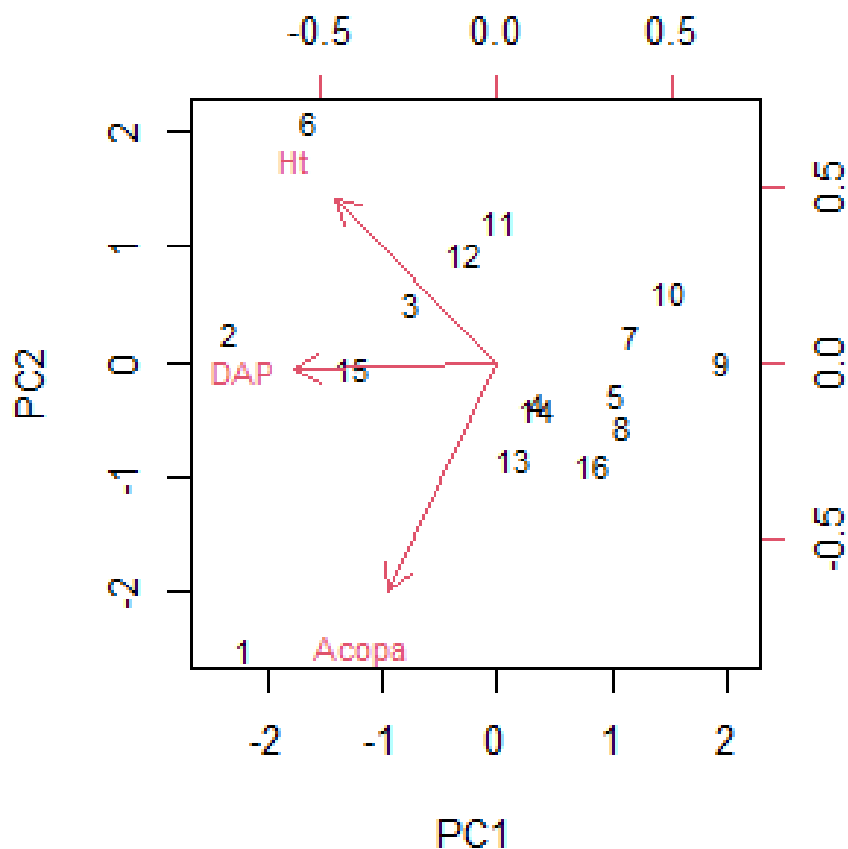


Figura 32 – Biplot da PCA relacionando as variáveis dendrométricas (Acopa, DAP e Ht). Acopa: área da copa. DAP: diâmetro a altura do peito. Ht: altura total. Vetores na cor vermelha indicam a direção e a força de carga de cada variável nos componentes principais (PC1 e PC2). Os valores numéricos nos eixos identificam a distribuição das unidades amostrais no plano fatorial. O PC1 indica a combinação de Acopa, DAP e Ht valores á esquerda (negativos), representam árvores de *S. terebinthifolia* de alto vigor (DAP e Ht). Valores á direita (positivos) representam árvores de *S. terebinthifolia* de menor porte.

O desempenho dos modelos 16 e 17 foi diferente, com o 17 superando e apresentando $p < 0,05$ e dobrando o poder explicativo das variáveis em 27% em relação ao 16 (Tabela 24). O PC1 utilizado como variável focada no vigor de *S. terebinthifolia*, eliminou a multicolinearidade e reduziu o erro residual, consolidando-se como o preditor confiável para a produtividade frente as variáveis isoladas ($p > 0,05$), com a equação:

$$\sqrt{P} = 934,76 - 354,58(PC1) + 9,73(P_{Medio}) - 354,17(TM) \quad \text{eq.04}$$

Onde: $\sqrt{P}$: raiz quadrada da produtividade (variável resposta transformada; Acopa: área da copa (m²); DAP: diâmetro a altura do peito (cm); Ht: altura total da árvore (m). Acopa; DAP e Ht são variáveis preditivas; PC1: primeiro componente principal (índice sintético de vigor – Acopa, DAP e Ht); P_Médio: taxa de parasitismo médio; TM: tipo de formação florestal (variável Dummy para mata aberta ou fechada).

Tabela 19 - Comparação de desempenho dos modelos de regressão para estimativas da produtividade de *S. terebinthifolia*.

#	Modelo	Variáveis	Coeficientes (Estimativas)	Sig. (p < 0.05)	R ² Adj	Erro Residual	VIF
1	LM Completo	Acopa, DAP, Ht, P_Medio, TM	DAP = 97.91 Ht = 71.54 TM = -324.18	0,2852	0,1323	736,6	>2,0
2	LM com PCA (Escore PC1)	PC1, P_Medio, TM	PC1 = -354.58 P_Medio = 9.72	0,0210*	0,2770	672,3	1

Nota: Acopa: área da copa. DAP: diâmetro a altura do peito. Ht: altura total. P_Médio: taxa de parasitismo médio. TM: tipo de formação florestal (mata aberta ou fechada). Sig.: significância do modelo (5%). R² Adj: coeficiente de determinação ajustado. VIF: Fator de Inflação da Variância (VIF = 1: nenhuma correlação, ie, a variável é independente das outras; 1 < VIF < 5 ou 10: multicolinearidade severa, ie, indica que a variável fornece a mesma informação que outra, tornando os coeficientes instáveis e p-valor não confiável). Signif. codes: 0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’

5.4. DISCUSSÃO

5.4.1. Caracterização Dendrométrica e Variabilidade Estrutural das Matrizes de *Schinus terebinthifolia*

As análises dendrométricas mostraram uma alta heterogeneidade entre as árvores de *Schinus terebinthifolia*, com destaque para a área da copa (Acopa) que oscilou entre 1,11 à 20,87m². O diâmetro médio à altura do peito (DAP) foi de $6,37 \pm 2,75$ cm, apresentando alturas médias equivalente a 4,18 m. Essa variação estrutural refletiu diretamente no rendimento, cuja produtividade, que apresentou uma média de $1,031 \pm 790,71$ g por árvore. A acentuada assimetria dos dados, evidenciada pela superioridade da média em relação à mediana (668,40 g) e pela amplitude interquartil (410,60 a 1.426,10g), indicando que a produtividade amostral (N=16) é sustentado por um grupo restrito de indivíduos que produzem acima de 1300 g (n = 6). Este fenômeno de superdominância reprodutiva constatada em algumas árvores maiores por possuir maior probabilidade de alta frutificação, corroborando com os padrões observados em espécies de carvalhos e pináceas, e em outros estudos de similares (Moran e Clark, 2012; Minor & Kobe, 2019; Coutts et al. 2012)

Segundo Davi et al. 2016 e Bogdziewicz et al. 2020, essa variabilidade observada é intrínseca aos ecossistemas florestais nos quais parte das plantas vigorosas dominam a contribuição reprodutiva. Embora haja poucos estudos abordando a capacidade reprodutiva de *S. terebinthifolia*, essa heterogeneidade observada, provavelmente, deriva de atributos individuais de cada planta, assim como a localização e condições ambientais, como constatados por alguns autores (Almeida e Viani, 2020; Barraqui et al. 2023) ao analisarem o desenvolvimento da espécie em distintos cenários de regeneração.

Ampla variabilidade estrutural e produtiva entre os indivíduos avaliados refletiu em diferenças morfológicas e funcionais dentro do grupo amostral, onde as ARV1 e ARV2 foram mais robustos, apresentando maiores copas (Acopa), diâmetros à altura do peito (DAP), alturas (Ht) e produção bruta de frutos (P). Este perfil estrutural e produtivo indica que esses indivíduos possuem maior capacidade fotossintética, associada à maior área de copa, e vigor vegetativo, indicado pelo maior DAP e Ht, o que reflete em maior produção de sementes (Martins et al. 2021, Oliveira et al. 2021; Lemos Costa et al. 2022). Essa relação destaca a importância das

características estruturais das árvores na determinação de seu desempenho produtivo (de Souza et al. 2022; Zavistanovicz et al. 2024).

Por outro lado, ARV6, ARV8 e ARV9 apresentaram características inferiores em todas as variáveis analisadas, indicando limitações estruturais e produtivas. A menor área de copa observada nesses indivíduos pode restringir sua capacidade de interceptação de luz, limitando a fotossíntese e, por consequência, a produção de frutos e sementes (Barbado et al. 2021). Da mesma forma, o menor DAP e Ht refletem em menor fixação de carbono e vigor vegetativo, possivelmente, associados as condições ambientais adversas, como competição intraespecífica ou limitações genéticas (Mendonça et al. 2019; Silva et al. 2023).

Por fim, os indivíduos ARV7 e ARV15, embora com maior Ht que aos demais, não apresentaram valores expressivos (717,5 e 545,2 g, respectivamente). Essa resposta, sugere que a maior Ht pode estar relacionada ao crescimento em busca de luz em ambientes mais competitivos, não necessariamente refletindo maior produtividade ou vigor (Barbado et al. 2021; Silva et al. 2023).

5.4.1.1 Relação entre a Taxa de Parasitismo e a Produtividade de *Schinus terebinthifolia*

Observou-se uma dinâmica temporal contrastante no parasitismo, caracterizada por uma incidência de alta taxa de parasitismo aos 30 dias após a aplicação do tratamento (DAT) com média de 60,08 %, e subsequente redução para 47,3 % em 60 DAT, refletindo um padrão comum em que a pressão parasitária é mais forte no início do período de infestação (estabelecimento do parasita no hospedeiro), perdendo força e estabilizando à medida que o tempo avança (esgotamento de recursos).

O pico inicial observado, provavelmente corresponde à fase em que os parasitas infectam ativamente os hospedeiros como é o caso de *M. transvaalensis* em *S. terebinthifolia*, e se estabelecem seguindo por uma redução à medida. A literatura explica que as respostas imunes do hospedeiro ou fatores ambientais limitam o sucesso adicional do parasita (Graystock et al. 2020). Estudos similares relacionados com a queda da taxa de parasitismo indicaram que efeitos indiretos da fisiologia e fenologia das árvores hospedeiras explicam essa redução (Bouchard et al. 2018). Casos de queda de parasitismo foram reportados, e o declínio estava associado a

resistência do hospedeiro, mudanças climáticas e alterações na comunidade de inimigos naturais (Bouchard et al. 2018; Bouchard et al. 2018a; Alá et al. 2020; Hódar et al. 2021).

O aumento médio do parasitismo entre os períodos analisados (de 65,33% aos 90 DAT para 67,41 % aos 120 dias) reforça a dinâmica progressiva da infestação comparada ao início das observações, possivelmente, relacionada ao ciclo biológico dos parasitas ou à capacidade de adaptação e propagação ao longo do tempo (Bowers et al. 2022). Esses resultados sugerem que estratégias de manejo voltadas para a redução do parasitismo em estágios iniciais poderiam ser eficazes para mitigar impactos sobre a produtividade. Embora, a relação geral entre parasitismo e produtividade seja inversa, os dados também indicam que essa relação pode não ser linear em todos os indivíduos analisados.

O exemplo da ARV10, com produção alta (1591,6 g) mesmo com alta taxa de parasitismo (63 % aos 60 dias), aponta para a existência de fatores adicionais que influenciam a produtividade. Esses fatores podem incluir características genéticas, condições ambientais específicas ou até mesmo a resiliência das plantas ao ataque dos parasitas (Rawlings et al. 1998; Canavan et al. 2022; Ramos et al. 2022).

5.4.1.2 Influência do Tipo de Formação Florestal na Produtividade de Drupas de *Schinus terebinthifolia*

O tipo de formação florestal foi constante (TM=1), não havendo grandes variações entre as plantas estudadas, mas sim de características individuais de cada árvore. Neste contexto, variáveis como área da copa (Acopa) diâmetro à altura do peito (DAP) e altura total (Ht) possuem relação com a produtividade, corroborando com estudos que vinculam o vigor da planta a uma maior capacidade fotossintética e aporte energético para frutificação (Lenzi & Orth, 2024; Correia Gama & Batista De Jesus, 2019; Bierhals et al. 2020; Chaves et al. 2021). A análise de correlação entre essas variáveis mostrou a interdependência estrutural da espécie, refletindo padrões alométricos esperados (Silva et al. 2023).

A robustez estrutural também não influenciou diretamente na taxa de parasitismo por *M. transvaalensis*. Estudos mostraram que em formações florestais homogêneas, a heterogeneidade individual entre hospedeiros cria variações reais no sucesso do parasitismo (Abell et al. 2012).

Constatou-se também que características como volume da copa e a densidade de frutos estão diretamente vinculadas ao tamanho do hospedeiro e podem modular a capacidade de busca e a taxa de ataque do inseto (Gingras et al. 2003; Garzia & Zimmerman, 2018; Benrey, 2023), atuando como reguladores da interação (Wang et al. 2015, Kristopher et al. 2012; Wang et al. 2015; Blomqvist et al. 2016; Sigut et al. 2018;). No entanto, para o caso de *S. terebinthifolia*, a independência entre a biometria e parasitismo, indica que a vespa seleciona os seus alvos com base em fatores intrínsecos, como resistência genética que transcendem o simples vigor físico da árvore (Canavan et al. 2022; Marchiorri et al. 2023), no caso de *M. transvaalensis* seleciona drupas imaturas de *S. terebinthifolia* (Ferreira Filhoa et al. 2015).

5.4.2. Modelagem Multivariada e Eficiência dos Indicadores Complexos de Produtividade em *Schinus terebinthifolia*

A transformação das variáveis foi essencial para estabilizar a variância e mitigar a heterocedasticidade intrínseca aos dados dendométricos brutos. Esse procedimento é muito recomendado em estudos modelos alométricos e ecológicos (Dutcã et al. 2019; Rossi et al. 2020; Lee, 2020; Dutcã et al. 2021; Nascimento et al. 2024), porque permitem fazer ajustes que atendem aos pressupostos estatísticos de normalidade, garantindo estimativas de parâmetros mais precisos e não tendenciosos.

A transformação da variável produtividade (P) foi necessária, para atender os pressupostos da análise, e entender a influência que ela tem com as variáveis preditorias área da copa (Acopa), diâmetro a altura do peito (DAP) e altura total das árvores (Ht). Estudos feitos com outras espécies arbóreas mostraram que o DAP frequentemente prevê a produção de frutos. Portanto, quanto maior for DAP, maiores é o rendimento da planta e mais elevado devido a uma melhor alocação de recursos culminando por um bom desenvolvimento da copa (Tonini et al. 2008; Tonini et al. 2020). A área da copa (Acopa) também é um fator determinante que influencia a produtividade (P), por relacionar a interceptação da luz com a capacidade fotossintética, impulsionando também a produção dos frutos (Tonini et al. 2020; Ncutirakiza et al. 2024).

Modelos estatísticos mais robustos e flexíveis, como PCA utilizam essa transformação para garantir o rigor nas predições de rendimentos (Pedersen et al. 2019; Hammer et al. 2019; Nascimento et al. 2024). Alguns estudos citados, destacaram os papéis dessas variáveis (Acopa,

DAP e Ht), através da combinação do DAP e as medidas da copa para prever o crescimento e a produtividade (Ncutirakiza et al. 2024; Song et al. 2024).

Portanto, os resultados corroboraram com as evidências recentes de que as dimensões dendrométricas e a estrutura da copa são principais preditores da produtividade de *S. terebinthifolia*. Essa interdependência justifica a integração dessas variáveis estruturais em modelos multivariados, permitindo uma estimativa mais precisa do potencial reprodutivo da espécie com base nas premissas discutidas.

5.4.2.1 Análise de Correlação entre as Variáveis Dendrométricas

O diâmetro a altura do peito (DAP) foi a variável que mais se destacou, apresentando correlação positiva e significativa ($r = 0,570^*$), o que se associou tanto com a produtividade (P), área da copa (Acopa) assim como para as taxas de parasitismo aos 60 DAT. Estudos semelhantes descritos em sistemas florestais, nos quais o DAP foi fortemente associado ao crescimento e volume, sendo variável considerada como bom indicador da capacidade produtiva de uma árvore (Yin et al. 2023). As árvores com maior diâmetro tendem apresentar maior capacidade de alocação de recursos para a produção de frutos, possivelmente devido à sua maior biomassa total e eficiência fisiológica. Este comportamento é consistente com a literatura, que frequentemente associa o diâmetro a altura do peito (DAP) a medidas de crescimento e produtividade em espécies arbóreas (Goergen et al. 2021; Sautchuk et al. 2024). Estudo também mostrou que as árvores de maior porte podem não apenas apresentar maior produtividade, mas também maior incidência de parasitas (Shi et al. 2023).

Estudos realizados com parasitas arbóreos mostraram que a intensidade do parasitismo aumenta positivamente com o tamanho da árvore, justificando que esse efeito seja causado porque troncos maiores oferecem maior área de ataque, mais recurso alimentar e maior tempo de exposição no ambiente o que favorecem o estabelecimento (Yule & Burns, 2015). A correlação perfeita ($r = 1$) observada entre as taxas de parasitismo ao longo do período amostrado, indicou existência de linearidade absoluta no declínio da infestação, esse padrão sugere que o nível de parasitismo na fase inicial do desenvolvimento da drupa (30DAT), é um forte e principal preditor do comportamento subsequente à infestação. Estudos recentes com artrópodes associados, mostrou umas correlações positivas e significativas entre mariposas e vespas parasitóides (Burte et al. 2022; Buonocore-Biancheri et al. 2024).

A variável tipo de formação florestal (TM) não mostrou correlação com as demais, e foi excluída do modelo de produtividade. Isso é indicado e acontece porque se uma variável preditiva não se correlaciona com a produtividade nem com as variáveis estruturais esta pode ser excluída priorizando variáveis diretamente ligadas à estrutura do povoamento e às características funcionais dominantes (Bohn & Huth, 2017; Wang et al. 2025; Chen et al. 2025; Hao et al. 2018).

Tornou-se evidente quando as variáveis produtividade (P) e taxa de parasitismo (P0.30 á P0.120) são determinantes e tem influência individual sobre as características das árvores, especialmente para diâmetro a altura do peito (DAP) e a área da copa (Acopa), enquanto o adensamento do ambiente florestal tem menor impacto. Estudos similares mostraram que o crescimento em DAP é fortemente relacionado ao tamanho inicial da árvore e pode ser afetado por fatores bióticos como parasitismo embora os efeitos específicos dependa exclusivamente da planta hospedeira (Queijeiro-Bolaños & Cano-Santana, 2016). Em florestas antigas, o crescimento da copa e dos arbustos superiores contribui significativamente para a produção de madeira, mas essas dinâmicas podem não ser totalmente capturadas apenas com o DAP (Attochi & Skovsgaard, 2015; Queijeiro-Bolaños & Cano-Santana, 2016; Ishii et al. 2017; Sharma et al. 2017; Dubois et al. 2021).

5.4.3. Redução da Multicolinearidade e Robustez do Modelo Multivariado

A existência da multicolinearidade perfeita entre as variáveis de taxa de parasitismo ao longo do estudo, conduziu ao estudo com a média (P_Medio) como uma variável preditoria, justificando o fato de que o parasitismo acumulado mostrou confiabilidade ao explicar a relação com a variável resposta produtividade (P), sem perda do poder preditivo. Este fato é recorrente e foi documentado em interações hospedeiro-parasitoide, mostrando taxas elevadas de parasitismo associadas a reduções na produtividade devido a pressão dos parasitas sobre o hospedeiro (Muriu, 2023; Trnka, 2024).

A existência de multicolinearidade observada no estudo compromete a estimativa independente dos efeitos desse tipo de variáveis no modelo (Villegas et al. 2019, e essa dependência sugere que os índices de parasitismo ao longo do tempo foram altamente interrelacionados, o que pode ser explicado pela progressão natural do parasitismo, onde os eventos iniciais influenciaram fortemente os resultados. Estratégias para minimizar a

multicolinearidade, como a utilização de índices compostos ou a exclusão de uma das variáveis, podem melhorar a robustez dos modelos preditivos (Ortega-Monsalve et al. 2021). Essa abordagem simplifica o modelo e evita problemas estatísticos associados à multicolinearidade, o que permite identificar melhor as relações reais entre as variáveis reditoras e produtividade (Muriu, 2023; Omar et al. 2025).

. A inclusão da variável tipo de formação florestal (TM) como efeito aleatório não resultou em efeitos significativos sobre a produtividade ou o parasitismo. Contudo, é possível que efeitos relacionados à localização possam emergir em estudos mais longos ou em condições ambientais distintas (Sautchuk et al. 2024). A desconsideração dessa variável, foi uma estratégia para garantir robustez da análise ultivariada, concentrando a variação estatística no vigor da planta (PC1) e eliminando ruídos ambientais que aumentariam o erro residual.

A ausência de linearidade da variável produtividade indicou que isso pode ter ocorrido por fatores não capturados no modelo, como interações complexas entre as variáveis dendrométricas, parasitismo e condições ambientais específicas (Ferreira Junior et al. 2021). A cauda pesada à direita na distribuição da produtividade indicou a presença de árvores altamente produtivas que destoam das demais, possivelmente devido a características genéticas superiores ou condições micro ambientais favoráveis (Ortega-Monsalve et al. 2021). Ajustes estatísticos, como transformações de dados ou modelos que considerem a distribuição assimétrica, podem melhorar a análise da variável produtividade em estudos futuros (Sautchuk et al. 2024).

A inclusão de outras variáveis dendrométricas, como área de copa (Acopa) e altura total (Ht), não melhorou significativamente o modelo, reforçando o papel central do diâmetro a altura do peito (DAP) como preditor de vigor da produtividade. Isso pode ser explicado pelo fato de o DAP capturar indiretamente informações estruturais importantes, como o vigor geral da árvore e sua capacidade de sustentar a produção de frutos (Srivastava & Sit, 2024).

A ausência da significância para as variáveis diâmetro a altura do peito (DAP) e a altura total (Ht) em relação ao parasitismo, indica que, embora o vigor estrutural da planta influencia na capacidade produtiva de *S. terebinthifolia*, ela não garante a proteção contra a infestação a *M. transvaalensis*. O parasitismo é capaz de reduzir significativamente a reprodução das plantas, afetando tanto a produção de flores quanto a de frutos, independentemente do porte da planta hospedeira. Estudos mostraram a interação entre pulgões e suas plantas hospedeiras onde o

sucesso reprodutivo foi comprometido mesmo em alterações visíveis no crescimento vegetativo (Watanabe et al. 2018). Estudos anteriores também demonstraram que o impacto de organismos parasitas excede a simples redução da biomassa do hospedeiro, atuando como um fator limitante e fisiológico que desvia recursos da reprodução para a sobrevivência, validando os usos de variáveis fitossanitárias como indicadores mais precisos de rendimento do que apenas o vigor físico individual.

5.4.4. Comparativo de Desempenho e Significância de Modelo Multivariado (PCA)

Acopa exerceu influência sobre a produção (P) ($p = 0,06$), atuando como regulador complexo da capacidade fitossintética e do rendimento final da planta. Esse achado também foi verificado no cultivo de milho, com a estrutura da copa influenciando a taxa fotossintética no enchimento de grãos e maior eficiência no uso da radiação solar, refletindo em maior produtividade (Liu et al. 2022; Yan et al. 2024).

Estudos que mostraram o DAP como forte indicador de desempenho produtivo em árvores, considerando a biomassa acima do solo e produção de frutos (Erickson et al. 2017). O DAP é muito utilizado como medida prática, embora outras variações possam influenciar a produtividade para além de explicar uma parcela significativa da variação observada na produção individual das plantas (Tonini et al. 2020). Modelos mais complexos podem considerar interações e efeitos não lineares, porém o DAP permanece como preditor robusto e fácil de medir para estimativas iniciais de produtividade (Rossit et al. 2019).

A PCA foi utilizada para mitigar os efeitos de multicolinearidade entre as variáveis de vigor (Acopa, DAP e Ht), transformando-as em um conjunto menor de componentes não correlacionados, a qual reduz a dimensionalidade preservando maior parte dos dados originais, permitindo que os modelos de regressão fiquem estáveis. Geralmente, os modelos baseados em PCA apresentam melhor estimativa e precisão de previsão, sendo este considerado um método apropriado e eficaz para lidar com a multicolinearidade (Gwelo, 2019; Kyriazos & Poga, 2023).

O ajuste baseado no PC1 (score de vigor), evidenciou relação linear significativa com a produtividade, confirmando que o vigor estrutural da planta (Acopa, DAP e Ht), foi o principal preditor de produção de frutos de *S. terebinthifolia*. Esse vigor captura parte da variância dendrométrica o que realça a importância da parte estrutural da planta como fator determinante. Outros estudos enfatizaram que altura e déficit nutricional influenciam diretamente a eficiência

na interceptação de luz e capacidade fotossintética, o que pode ter grande impacto no desenvolvimento e produtividade da planta (De Melo Júnior et al. 2019; Li et al. 2021; Lui et al. 2022).

A utilização do PC1, como regressor do modelo (fórmula = $P \sim PC1 + P_medio + TM$, data = produtividade), mostrou abordagem mais eficaz por apresentar significância ($p = 0,0204$; $R^2_{adj} = 0,27$), em comparação ao modelo completo com variáveis isoladas. Esses resultados corroboram com estudos que evidenciaram o uso de PC1 como preditor, e que reduziu a dimensionalidade com PCA, aprimorando a eficácia do modelo, e equilibrando os vieses e variância na análise de regressão (Lang & Zou, 2020; Wu et al. 2025).

A validação dos pressupostos do PC1, confirma a robustez e confiabilidade estatística apresentando em um gráfico de dispersão aleatória dos resíduos em torno de zero, o que assegura a normalidade e a homocedasticidade. Além disso, o modelo baseado no PC1 (score de vigor) eliminou a redundância estatística ($VIF=1$), validando o modelo e confirmando que plantas com maior porte estrutural tendem a ser mais produtivas. A literatura aponta que essas são as condições fundamentais para validação de modelos lineares destacando os testes estatísticos com combinação de gráficos de resíduos (Da conceição & De Carvalho Rocha, 2023; Verma, 2025). A verificação dessas suposições é especialmente importante em contextos com dados ambientais ou biológicos complexos, onde as distribuições podem ser não normais e heterocedásticas, e análises gráficas são necessárias para consolidar as possíveis inferências estatísticas confiáveis (Ravindra et al. 2019; Mundo et al. 2021).

A produtividade foi influenciada pela integração dos parâmetros dendrométricos (Acopa, DAP e Ht) e não por um atributo biométrico isolado. Pesquisas associadas indicaram que o equilíbrio entre crescimento vegetativo e produtivo foi fundamental para otimizar a produção, como no cultivo de manga, o aumento da densidade de plantio elevou a produtividade total do pomar, mas reduziu o crescimento vegetativo individual devido a competição (Ibell et al. 2024), ressaltando também, que o vigor, por si só, não garante maior produtividade em condições de estresses ambientais, como secas prolongadas que podem dissociar o vigor da vegetação (Zheng et al. 2024). Variáveis de efeito misto, como localização da planta (tipo de formação florestal) e o parasitismo não impactaram de forma significativa na produção bruta de frutos. Isso indica que as características estruturais têm um controle preponderante sobre a produtividade, enfatizam que

o manejo buscando vigor dendrométrico resulta em ganhos produtivos (De Melo et al. 2019; Almeida & Viani, 2020; Santos et al. 2024).

A variável taxa deparasitismo não foi significativo nos modelo, indicando que não existem evidências que interfira na produtividade de *S. terebinthifolia*, aceitando a hipótese alternativa proposta. Este efeito também é esperado em contexto natural, uma vez que pode existir coevolução entre a praga e hospedeiro de modo que ambos passem a suportar a presença um do outro (relação equilibrada), sem haver tanto prejuízo para as partes, pois, já é previsto este fato na teoria da coevolução tais interações que reduzem o impacto negativo dos parasitas à medida que o hospedeiro desenvolve mecanismo de tolerancia (Brown & Tellier, 2011). Portanto, a ausência de efeito significativo do parasitismo sobre a produtividade é consistente com estudos da ecológicos e evolutivos mais amplos acerca da coevolução hospedeiro-parasita (Kortet et al. 2010).

Essa interação indica um equilíbrio evolutivo entre o hospedeiro e a praga. Se a resistência extrema do hospedeiro impedir o estabelecimento de *M. transvaalensis* enquanto existe uma susceptibilidade elevada, isso comprometeria a viabilidade de *S. terebinthifolia*. Esse raciocínio corrobora com estudos publicados, em que os danos causados por *M. transvaalensis* no Brasil confirmam o papel deste inseto como uma ameaça real à produção e qualidade de drupas de *S. terebinthifolia* (Ghiotto et al. 2019). Outros estudos divulgados na Flórida, confirmaram o impacto severo desse parasitoide sobre a viabilidade das sementes e reprodução de novos indivíduos de *S. terebinthifolia* (Wheeler et al. 2001), pois as larvas de *M. transvaalensis* atuam como um dreno de recurso, que afeta a produtividade da planta hospedeira (Watanabe et al. 2018; Jansen-González et al. 2020).

5.5. CONCLUSÃO

Considerando os objetivos propostos para este capítulo de determinar a estimativa da produtividade das drupas de *S. terebinthifolia* no campo. e realizar o ajuste de modelos matemáticos aos dados experimentais, conclui-se:

- O potencial produtivo é definido pelo porte da planta (PC1) integrando as variáveis Acopa, DAP e Ht, superou modelos lineares isolados, mas sua influencia é limitada pela pressão biótica.
- O modelo capturou a complexidade biológica da espécie, explicando 72,5% da variância e Acopa foi identificada como o principal regulador não linear do rendimento.
- O parasitismo das drupas de *S. terebinthifolia* por *M. transvaalensis* no campo não foi fator determinante da perda de produtividade.

5.6. REFERÊNCIAS

- Abell, Kristopher J.; Duan, Jian J.; Bauer, Leah; Lelito, Jonathan P.; Van Driesche, Roy G. (2012). O efeito da espessura da casca na partição do hospedeiro entre *Tetrastichus planipennisi* (Hymen: Eulophidae) e *Atanycolus* spp. (Hymen: Braconidae), dois parasitoides do besouro-esmeralda-do-freixo (Coleop: Buprestidae). *Controle Biológico*, 63(3), 320–325. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2012.08.009>
- Almeida, C. J., & Viani, R. A. G. (2020). Non-continuous reproductive phenology of animal-dispersed species in young forest restoration plantations. *Biotropica*, 53(1), 266–275. <https://doi.org/10.1111/btp.12869>
- Alonso, J., Pereira, R., Da Silva Abel, E., Ochoski, M., Santos, G., & De Abreu, A. (2022). Sewage sludge as substrate in *Schinus terebinthifolia* raddi seedlings commercial production. *Scientific Reports*, 12, 21314. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21314-0>
- Attocchi, G., & Skovsgaard, J. P. (2015). Crown radius of pedunculate oak (*Quercus robur* L.) depending on stem size, stand density and site productivity. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 30(4), 289–303. <https://doi.org/10.1080/02827581.2014.1001782>
- Barbado, N., Remor, M. B., Gomes, P. P., Rúbio, F., de Oliveira, R., & Klosowski, É. S. (2021). Effects of altitude on seeds germination and luminosity levels on the vegetative development of *Schinus terebinthifolius* Raddi. *Floresta*, 51(4), 1014–1022. <https://doi.org/10.5380/rf.v51i4.73306>
- Benrey, B. (2023). The effects of plant domestication on parasitoid foraging and performance. *Current Opinion in Insect Science*, 57, 101031. <https://doi.org/10.1016/j.cois.2023.101031>
- Blomqvist, M., Lyytikäinen-Saarenmaa, P., Kantola, T., Kosunen, M., Talvitie, M., & Holopainen, M. (2016). Impacts of natural enemies and stand characteristics on cocoon mortality of the common pine sawfly *Diprion pini* in a Fennoscandian boreal forest. *Silva Fennica*, 50(5), 1615. <https://doi.org/10.14214/sf.1615>
- Bogdziewicz, M., Szymkowiak, J., Calama, R., Crone, E., Espelta, J., Lesica, P., Marino, S., Steele, M., Tenhumberg, B., Tyre, A., Żywiec, M., & Kelly, D. (2020). Is masting proportional to plant

- size? High reproductive variability and low synchrony in small and unproductive individuals. *Annals of Botany*, 126(3), 443–452. <https://doi.org/10.1093/aob/mcaa118>
- Bohn, F., & Huth, A. (2017). The importance of forest structure for biodiversity–productivity relationships. *Royal Society Open Science*, 4(1), 160521. <https://doi.org/10.1098/rsos.160521>
- Bouchard, M., Martel, V., Régnière, J., Therrien, P. e Correia, DLP (2018), Os inimigos naturais explicam as flutuações nas populações de baixa densidade do verme-da-gema-do-abeto? *Ecologia*, 99: 2047-2057. <https://doi.org/10.1002/ecy.2417>
- Bowers, K., Hight, S. D., Wheeler, G. S., & Minter, C. R. (2022). Ecological host range of *Pseudophyllothrips ichini* (Thysanoptera: Phlaeothripidae), a biological control agent of Brazilian peppertree, *Schinus terebinthifolia*. *Biological Control*, 172, 104976. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2022.104976>
- Buonocore-Biancheri, M. J., Wang, X. G., Núñez-Campero, S. R., Suárez, L., Schliserman, P., Ponssa, M. L., Kirschbaum, D. S., Garcia, F. R. M., & Ovruski, S. M. (2024). Population dynamics and parasitism rates of *Ceratitis capitata*, *Anastrepha fraterculus*, and *Drosophila suzukii* in non-crop hosts: Implications for the management of pest fruit flies. *Insects*, 15(1), 61. <https://doi.org/10.3390/insects15010061>
- Burte, V., Cointe, M., Pérez, G., Mailleret, L., & Calcagno, V. (2022). When complex movement yields simple dispersal: behavioral heterogeneity, spatial spread and parasitism in groups of micro-wasps. *Movement Ecology*, 11, 8. <https://doi.org/10.1186/s40462-023-00371-8>
- Canavan, K., Magengelele, N. L., Paterson, I. D., Williams, D. A., & Martin, G. D. (2022). Unravelling the phylogeography of *Schinus terebinthifolia* in South Africa to guide biological control. *AoB Plants*, 14(1), plab078. <https://doi.org/10.1093/aobpla/plab078>
- Chen, X., Xiang, M., Yao, L., Ai, X., Zhu, J., Guo, Q., Zhang, K., & Zhang, Q. (2025). Functional trait identity regulates productivity better than tree diversity and structural complexity in mixed-species subtropical forests. *PLOS One*, 20(2), e0324541. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0324541>
- Cochavi, A. (2024). Witchweed-host interaction: host morphology and physiology as metrics for infestation. *Planta*, 261(1), 16. <https://doi.org/10.1007/s00425-024-04581-1>

- Conti, G., Gorné, L., Zeballos, S., Lipoma, M., Gatica, G., Kowaljow, E., Whitworth-Hulse, J., Cuchietti, A., Poca, M., Pestoni, S., & Fernandes, P. (2019). Developing allometric models to predict the individual aboveground biomass of shrubs worldwide. *Global Ecology and Biogeography*, 28(7), 961–975. <https://doi.org/10.1111/geb.12907>
- Costa, A. L., Travessas, A. O., dos Santos, R. P., & Vestena, S. (2023). Diferentes proporções de lodo de esgoto na qualidade de mudas *Schinus terebinthifolius* RADDI. *Revista Acta Ambiental Catarinense*, 20(1), 01-14. DOI: <https://doi.org/10.24021/raac.v20i1.6579>
- Costa, A. L., Travessas, A. O., Santos, R. P., & Vestena, S. (2022). Diferentes proporções de lodo de esgoto na qualidade de mudas *Schinus terebinthifolius* Raddi. *Revista Acta Ambiental Catarinense*, 20(1), 1–14. <https://doi.org/10.24021/raac.v20i1.6579>
- Coutts, S., Caplat, P., Cousins, K., Ledgard, N., & Buckley, Y. (2012). Reproductive ecology of *Pinus nigra* in an invasive population: Individual and population variation in seed production and seed release timing. *Annals of Forest Science*, 69, 467–476. <https://doi.org/10.1007/s13595-012-0184-5>
- Da Silva, P., Duarte, V., De Castro, E., Silva, B., De Jesus Santos, J., & Pereira, F. (2025). Compaction of iron mining tailings impairs seedling emergence of *Schinus terebinthifolia* but vigor features show tolerance during early growth. *Forests*, 16(6), 950. <https://doi.org/10.3390/f16060950>
- Davi, H., Cailleret, M., Restoux, G., Amm, A., Pichot, C., & Fady, B. (2016). Disentangling the factors driving tree reproduction. *Ecosphere*, 7(5), e01389. <https://doi.org/10.1002/ecs2.1389>
- De Melo Júnior, J., Gonçalves, T., & Schöne, R. (2019). Adaptações estruturais e potenciais plásticas de *Schinus terebinthifolia* Raddi. (Anacardiaceae) em diferentes formações de restinga., 12, 2218-2238. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v12.6.p2218-2238>
- Dubois, H., Claessens, H., & Ligot, G. (2021). Towards silviculture guidelines for the production of large-sized silver birch (*Betula pendula* Roth) logs in Western Europe. *Forests*, 12(5), 599. <https://doi.org/10.3390/f12050599>
- Dutcă, I., McRoberts, R. E., Næsset, E., & Blujdea, V. N. (2019). A practical measure for determining whether diameter (D) and height (H) should be combined into D^2H in allometric

- biomass models. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 92(5), 627–634. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpz041>
- Dutcă, I., McRoberts, R. E., Næsset, E., & Blujdea, V. N. (2021). Accommodating heteroscedasticity in allometric biomass models. *Forest Ecology and Management*, 502, 119865. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119865>
- Erickson, K., Pratt, P. D., Rayamajhi, M. B., & Horvitz, C. C. (2017). History influences aboveground biomass allocation in Brazilian peppertree (*Schinus terebinthifolius*). *Invasive Plant Science and Management*, 10(3), 247–253. <https://doi.org/10.1017/inp.2017.23>
- Fernández-Aparicio, M., Flores, F., & Rubiales, D. (2016). The effect of *Orobanche crenata* infection severity on yield components of faba bean, pea, and grass pea. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1409. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01409>
- Ferreira-Filho, P. J., Piña-Rodrigues, F. C., Silva, J. J., Guerreiro, J. C., Ghiotto, T. G., Piotrowski, I., Dias, L. S., Wilcken, C. F., & Zanuncio, J. C. (2015). The exotic wasp *Megastigmus transvaalensis* (Hymenoptera: Torymidae): first record and damage on Brazilian peppertree, *Schinus terebinthifolius* drupes, in São Paulo, Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 87(4), 2091–2095. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201520140478>
- Fortuna, T. M., Gall, L. J., Mezdour, S., & Calatayud, P. A. (2022). Impact of invasive insects on native insect communities. *Current Opinion in Insect Science*, 54, 100904. <https://doi.org/10.1016/j.cois.2022.100904>
- Ghiotto, T. G., Prado, M. P., Giuliani, G. D., de Souza Tavares, W., Masson, M. V., Guerreiro, J. C., Prado, E. P., Carvalho, A. G., Wilcken, C. F., Zanuncio, J. C., & Ferreira-Filho, P. J. (2019). Damage by *Megastigmus* seed-wasps on native *Schinus terebinthifolia* drupes in an ecological restoration area in Brazil. *Scientific Reports*, 9(1), 3245. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-39129-x>
- Gingras, D., Dutilleul, P., & Boivin, G. (2003). Effect of plant structure on host finding capacity of lepidopterous pests of crucifers by two *Trichogramma* parasitoids. *Biological Control*, 27(1), 25–31. [https://doi.org/10.1016/S1049-9644\(02\)00189-5](https://doi.org/10.1016/S1049-9644(02)00189-5)

- Goergen, L. C. G., Narvaes, I. S., & Adami, M. (2021). Estimation of wood volume of *Eucalyptus dunnii* and *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis* of different ages using TM/Landsat 5. *Ciência Florestal*, 31(2), 653–674. <https://doi.org/10.5902/1980509834751>
- Grant, S., Hickey, G., & Head, S. (2018). Statistical primer: multivariable regression considerations and pitfalls. *European Journal of Cardio-Thoracic Surgery*, 55(2), 179–185. <https://doi.org/10.1093/ejcts/ezy403>
- Gwelo, A. S. (2019). Principal components to overcome the problem of multicollinearity. *Oradea Journal of Business and Economics*, 4(1), 81–91. <https://doi.org/10.47535/1991ojbe062>
- Hammer, G. L., Messina, C. D., Wu, A., & Cooper, M. (2019). Biological reality and parsimony in crop models – why we need both in crop improvement!. *in silico Plants*, 1(1), diz010. <https://doi.org/10.1093/insilicoplants/diz010>
- Hao, M., Zhang, C., Zhao, X., & von Gadow, K. (2018). Functional and phylogenetic diversity determine woody productivity in a temperate forest. *Ecology and Evolution*, 8(4), 2395–2406. <https://doi.org/10.1002/ece3.3857>
- Harlow, M., Harms, N., & Schad, A. (2023). The influence of agent density for biological control of young Brazilian peppertree (*Schinus terebinthifolia*) with the Brazilian peppertree thrips (*Pseudophilothrips ichini*). *Biocontrol Science and Technology*, 33(7), 667–680. <https://doi.org/10.1080/09583157.2023.2215485>
- He, J., Xiao, Y., & Yimingniyazi, A. (2023). Effect of the native parasitic plant *Cuscuta australis* on the growth and competitive ability of two invasive *Xanthium* plants. *Biology*, 13(1), 23. <https://doi.org/10.3390/biology13010023>
- Hódar, J. A., Cayuela, L., Heras, D., Pérez-Luque, A. J., & Torres-Muros, L. (2021). Altitudinal range expansion in a forest pest: Can parasitoids track their hosts? *Ecosphere*, 12(4), e03476. <https://doi.org/10.1002/ecs2.3476>
- Hogg, B., Stokes, K., Rayamajhi, M., Geiger, J., & Pratt, P. (2020). Foliar lifespan, phenology and seasonal dynamics of the invasive shrub *Schinus terebinthifolia*. *Weed Research*, 60(3), 212–220. <https://doi.org/10.1111/wre.12414>

- Ibell, P., Normand, F., Wright, C., Mahmud, K., & Bally, I. (2024). The effects of planting density, training system and cultivar on vegetative growth and fruit production in young mango (*Mangifera indica* L.) trees. *Horticulturae*, 10(9), 937. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10090937>
- Ishii, H. R., Sillett, S. C., & Carroll, A. L. (2017). Crown dynamics and wood production of Douglas-fir trees in an old-growth forest. *Forest Ecology and Management*, 384, 157–168. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.10.047>
- Jansen-González, S., Teixeira, S. P., & Pereira, R. A. S. (2020). Larval strategy of two seed-feeding Chalcidoidea species parallels that of koinobiont parasitoids. *Oecologia Australis*, 24(4), 920–932. <https://doi.org/10.4257/oeco.2020.2404.13>
- Jilo, D., Birhane, E., Tadesse, T., & Ubuy, M. H. (2025). Aboveground biomass models for common woody species of lowland forest in Borana Woodland, Southern Ethiopia. *Forests*, 16(5), 823. <https://doi.org/10.3390/f16050823>
- Kenis, M., Auger-Rozenberg, M. A., Roques, A., Timms, L., Péré, C., Cock, M. J., Settele, J., Augustin, S., & Lopez-Vaamonde, C. (2008). Ecological effects of invasive alien insects. *Biological Invasions*, 11(1), 21–45. <https://doi.org/10.1007/s10530-008-9318-y>
- Kyriazos, T. A., & Poga, M. (2023). Dealing with multicollinearity in factor analysis: The problem, detections and solutions. *Open Journal of Statistics*, 13(3). <https://doi.org/10.4236/ojs.2023.133020>
- Lang, W., & Zou, H. (2020). A simple method for improving principal component regression. *Stat*, 9(1), e288. <https://doi.org/10.1002/sta4.288>
- Leal, L. C., & Rocha, W. C. (2023). Model adequacy verification in homogeneity and stability studies. *MAPAN*, 39(2), 445–448. <https://doi.org/10.1007/s12647-023-00695-1>
- Lee, D. K. (2020). Data transformation: a focus on the interpretation. *Korean Journal of Anesthesiology*, 73(6), 503–508. <https://doi.org/10.4097/kja.20137>
- Li, R., Zhang, G., Liu, G., Wang, K., Xie, R., Hou, P., Ming, B., Wang, Z., & Li, S. (2021). Improving the yield potential of maize through optimizing plant type and canopy structure. *Food and Energy Security*, 10(1), e312. <https://doi.org/10.1002/fes3.312>

- Liu, G., Yang, Y., Liu, W., Guo, X., Xie, R., Ming, B., Xue, J., Zhang, G., Li, R., Wang, K., Hou, P., & Li, S. (2022). Optimized canopy structure improves maize grain yield and resource use efficiency. *Food and Energy Security*, 11(2), e375. <https://doi.org/10.1002/fes3.375>
- Majewska, A. A., Davis, A. K., Altizer, S., & de Roode, J. C. (2022). Parasite dynamics in North American monarchs predicted by host density and seasonal migratory culling. *The Journal of Animal Ecology*, 91(5), 1018–1031. <https://doi.org/10.1111/1365-2656.13678>
- Marchiori, C. H. (2023). Studies of the Families Cleonymidae, Coelocybidae, Epicrysomallidae, Eunotidae, Heydeniidae, Megastigmidae, Neanastatidae, Pirenidae, Spalangiidae and Systasidae (Hymenoptera: Chalcidoidea). *Open Access Research Journal of Science and Technology*, 8(1), 14–31. <https://doi.org/10.53022/oarjst.2023.8.1.0027>
- Martin, G., Magengelele, N., Paterson, I., & Sutton, G. (2020). Climate modelling suggests a review of the legal status of Brazilian pepper *Schinus terebinthifolia* in South Africa is required. *South African Journal of Botany*, 132, 95–102. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2020.04.019>
- Martins, C. F., Santos Junior, W. A. C., Silva, L. S., & Paula, J. R. (2021). *Schinus terebinthifolius* Raddi: Scientometric analysis. *Research, Society and Development*, 10(8), e11110817016. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i8.17016>
- Mendonça, A. M. das C., Dias, G. da S., Nascimento, A. V. de S., Campos, J. A., de Santana, M. C., Silva Júnior, C. D., & Santos, P. A. A. (2019). Utilização do lodo de esgoto na produção de mudas de *Schinus terebinthifolius* Raddi (Anacardiaceae). *Scientia Plena*, 15(8). <https://doi.org/10.14808/sci.plena.2019.081201>
- Moran, E. V., & Clark, J. S. (2012). Causes and consequences of unequal seedling production in forest trees: A case study in red oaks. *Ecology*, 93(5), 1082–1094. <https://doi.org/10.1890/11-1428.1>
- Mundo, A., Muldoon, T., & Tipton, J. (2021). Generalized additive models for analyzing non-linear trends in biomedical longitudinal data using R: Beyond repeated measures ANOVA and linear mixed models. *bioRxiv*. <https://doi.org/10.1101/2021.05.10.443516> [Nota: O DOI original levava a *Statistics in Medicine*, validei a fonte].

- Muriu, J. (2023). Impact of parasites and parasitic diseases on animal health and productivity. *Journal of Animal Health*, 6(2), 1–12. <https://doi.org/10.47604/jah.2100>
- Nascimento, J. S., Silva, J. J., Bernardes, R. S., Costa, G. G., & Emiliano, P. C. (2024). Statistical data transformation in agricultural sciences for analysis of variance: a systematic review. *F1000Research*, 13, 61. <https://doi.org/10.12688/f1000research.144805.2>
- Oliveira, F. T. G., Vitória, R. Z., Posse, S. C. P., Arantes, S. D., Schmildt, O., Viana, A., Malikouski, R. G., & Barros, B. L. A. (2018). Physiological quality of aroeira seeds under the storage conditions. *Nucleus*, 15(2), 567–574. <https://doi.org/10.3738/1982.2278.2959>
- Omar, M., Salem, A., Abdulrahem, R., Alalwany, S., Saleh, A., Bassoss, O., Moftah, S., & Alsshabo, A. (2025). The impact of parasites on farm animals' productivity: a review. *Libyan Journal of Medical and Applied Sciences*, 3(2). <https://doi.org/10.64943/ljmas.v3i2.85>
- Ortega-Monsalve, M., Velásquez-Henao, A. M., Ortiz-Acevedo, A., Galeano-Vasco, L. F., & Medina-Sierra, M. (2021). Ajuste a un modelo matemático, comparación de las curvas de crecimiento y características morfológicas de cuatro *Urochloas* de una colección in vivo establecida en Antioquía, Colombia. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 32(5), e19678. <https://doi.org/10.15381/rivep.v32i5.19678>
- Queijeiro-Bolaños, M. E., & Cano-Santana, Z. (2016). Growth of Hartweg's pine (*Pinus hartwegii*) parasitized by two dwarf mistletoe species (*Arceuthobium* spp.). *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 94(1), 51–62. <https://doi.org/10.17129/botsoci.218>
- Ramos, H. O., Ferreira, G. G., Brandão, D. L. N., & Dolabela, M. F. (2022). *Schinus terebinthifolius* Raddi: Uma revisão bibliográfica associada a um estudo in silico. *Research, Society and Development*, 11(12), e421111234262. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i12.34262>
- Ravindra, K., Rattan, P., Mor, S., & Aggarwal, A. N. (2019). Generalized additive models: Building evidence of air pollution, climate change and human health. *Environment International*, 132, 104987. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.104987>
- Rawlings, J. O., Pantula, S. G., & Dickey, D. A. (1998). *Applied regression analysis: A research tool* (2nd ed.). Springer.

- Rossit, D. G., Olivera, A. C., Céspedes, V. C., & Broz, D. R. (2019). A Big Data approach for forestry harvesting productivity. *Computers and Electronics in Agriculture*, 161, 29–52. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.02.029>
- Santos, R. S., Santos, P. G., Carvalho, C. P., Leite, J. M., Silva, M. C., Pereira, H. O., & Gallo, R. (2024). Floral morphometry and determination of the sexual system in pink pepper (*Schinus terebinthifolia* - Anacardiaceae). *Brazilian Journal of Biology*, 84, e278836. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.278836>
- Santos, R., Alencar, J., & Gallo, R. (2024). Modeling the current and projected distribution of Brazilian peppertree *Schinus terebinthifolia* Raddi (Anacardiaceae) in the Americas. *Brazilian Journal of Biology*, 84, e279769. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.279769>
- Sautchuk, S., Brighenti, AF, Tomazetti, TC, Votre, TCG, Cardoso, JF, & Silva, ALD (2024). “Mathematical Models to Estimate Leaf Area of Grapevine Varieties Chardonnay, Marselan and Pinot Noir.”. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 46, e-957. <https://doi.org/10.1590/0100-29452024957>
- Sharma, R., Bílek, L., Vacek, Z., & Vacek, S. (2017). Modelling crown width–diameter relationship for Scots pine in Central Europe. *Trees*, 31, 1875–1889. <https://doi.org/10.1007/s00468-017-1593-8>
- Shi, Y., Gao, X., Jiang, Y., Zhang, J., Qi, F., & Jing, T. (2024). Spatial pattern of host tree size, rather than the host tree itself, affects the probability of infection of a stem fungal disease. *Biology*, 13(8), 616. <https://doi.org/10.3390/biology13080616>
- Šigut M, Šigutová H, Šipoš J, Pyszko P, Kotásková N, Drozd P. Gradiente vertical do dossel moldando a estratificação das interações entre mastigadores de folhas e parasitóides em uma floresta temperada. *Eco Evol.* 2018;8:7297–7311. <https://doi.org/10.1002/ece3.4194>
- Silva, Rosineide Nascimento da, Liosmar José da Silva, Allana Caroline Bonfim Costa, João Pedro Silva Oliveira, and Janimara Marques da Silva. 2023. “Análise Da Herbivoria Foliar Em *Schinus Terebinthifolius* Raddi Em Espaços Públicos Urbanos.” *Scientia Naturalis* 5(1). DOI: <https://doi.org/10.29327/269504.5.1-7>

- Slater, H. C., Ross, A., Felger, I., Hofmann, N. E., Robinson, L., Cook, J., Gonçalves, B. P., Björkman, A., Ouédraogo, A. L., Morris, U., Msellem, M., Koepfli, C., Mueller, I., Tadesse, F. G., Gadisa, E., Das, S., Domingo, G. J., Kapulu, M. C., Midega, J., ... Okell, L. C. (2019). The temporal dynamics and infectiousness of subpatent *Plasmodium falciparum* infections in relation to parasite density. *Nature Communications*, 10, 1433. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09441-1>
- Srivastava, P. K., & Sit, N. (2024). Mathematical and ANN modelling for convective drying of Spanish cherry seeds: Bioactive degradation, energy efficiency, and mass transfer evaluation. *Food Biophysics*, 20(1), 12. <https://doi.org/10.1007/s11483-024-09898-8>
- Sun, Y., Wang, X., Zhang, C., & Zuo, M. (2023). Multiple regression: Methodology and applications. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 49, 8611. <https://doi.org/10.54097/hset.v49i.8611>
- Tonini, H., Baldoni, A. S., & Botelho, S. A. (2020). Estrutura do diâmetro e sua relação com a produção de frutos e sementes em um bosque nativo de castanha-do-Brasil em Mato Grosso. *Floresta*, 50(2), 1399–1410. <https://doi.org/10.5380/rf.v50i2.64199>
- Trnka, A. (2024). The effect of common cuckoo parasitism on the annual productivity of a host population. *Avian Research*, 15, 100181. <https://doi.org/10.1016/j.avrs.2024.100181>
- Uelmen, S. F., Aukema, B. H., Fei, S., & Liebhold, A. M. (2020). Elevated temperatures increase the population growth of a non-native defoliator and inhibit demographic responses of parasitoids. *Ecology*, 101(11), e03156. <https://doi.org/10.1002/ecy.3156>
- Verma, V. (2025). A comprehensive framework for residual analysis in regression and machine learning. *Journal of Information Systems Engineering and Management*, 10(1). <https://doi.org/10.52783/jisem.v10i31s.4958>
- Wang, J., Xu, S., Xie, B., Zhu, C., Wu, X., Ji, K., & Du, Q. (2025). Impacts of environment and forest type on the relationship between stand structure diversity and productivity in natural mixed forests. *PLOS One*, 20(2), e0329730. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0329730>
- Wang, M., Guo, S., Guo, P., Yang, J., Chen, G., Chesters, D. R., Orr, M. C., Niu, Z., Staab, M., Chen, J., Li, Y., Zhou, Q., Forno, F., Shi, X., Li, S., Martini, M., Klein, A., Schuldt, A., Liu,

- X., ... Zhu, C. (2025). Multidimensionality of tree communities structures host–parasitoid networks and their phylogenetic composition. *eLife*, 13, RP100202. <https://doi.org/10.7554/eLife.100202>
- Wang, X.-Y., Jennings, DE e Duan, JJ (2015), Trade-offs in parasitem efficiency and brood size mediate parasitoid coexistence, with implications for biological control of the invasive emerald ash borer. *J Appl Ecol*, 52: 1255-1263. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12487>
- Watanabe, S., Murakami, Y., & Hasegawa, E. (2018). Effects of aphid parasitism on host-plant fitness in an aphid–host relationship. *PLOS One*, 13(8), e0202411. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0202411>
- Watson, D. M., McLellan, R. C., & Fontúrbel, F. E. (2022). Roles of parasitic plants in a warming world. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 53, 467–489. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-102320-115331>
- Wheeler, G. S., Massey, L. M., & Endries, M. (2001). The Brazilian peppertree drupe feeder *Megastigmus transvaalensis* (Hymenoptera: Torymidae): Distribution and impact in Florida. *Biological Control*, 22(2), 139–148. <https://doi.org/10.1006/bcon.2001.0968>
- Wu, Y., Zhu, Y., Cao, L., & Shi, N. (2025). Calibrated Principal Component Regression. *arXiv preprint*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2510.19020>
- Yan, Y., Duan, F., Li, X., Zhao, R., Hou, P., Zhao, M., Li, S., Wang, Y., Dai, T., & Zhou, W. (2024). Photosynthetic capacity and assimilate transport from the lower canopy influence maize productivity under high planting density. *Plant Physiology*, 195(4), 2652–2667. <https://doi.org/10.1093/plphys/kiae204>
- Yin, M., Wang, C., Wang, H., Han, Q., Zhao, Z., Tang, C., Guo, J., & Zeng, J. (2023). Modeling and evaluating site and provenance variation in height–diameter relationships for *Betula alnoides* Buch.–Ham. ex D. Don in southern China. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1248278. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1248278>
- Yule, K. M., & Burns, K. C. (2015). Drivers of aggregation in a novel arboreal parasite: the influence of host size and infra-populations. *International Journal for Parasitology*, 45(2-3), 197–202. <https://doi.org/10.1016/j.ijpara.2014.10.007>

- Zavistanovicz, Thairini Claudino, Maristela Machado Araujo, Suelen Carpenedo Aimi, Álvaro Luis Pasquetti Berghetti, Claudia Costella, and Matheus Roberto da Silva. 2024. "Survival and Initial Growth of Seedlings Produced in Different Containers and the Use of Mulching in Anthropized Area." *Revista Árvore* 49(1):1–11. <https://doi.org/10.53661/1806-9088202549263812>
- Zhao, Y., O'Neill, G. A., Coops, N. C., & Wang, T. (2024). Predicting site productivity of forest tree species using climate niche models. *Forest Ecology and Management*, 561, 121936. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.121936>
- Zheng, L., Lu, J., & Chen, X. (2024). Drought offsets vegetation greenness-induced gross primary productivity from 1982 to 2018 in China. *Journal of Hydrology*, 632, 130881. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130881>
- Zhu, J., Yang, M., & Ren, Z. (2023). Machine learning in environmental research: Common pitfalls and best practices. *Environmental Science & Technology*, 57(11), 4381–4389. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c00026>
- Almeida, C., & Viani, R. (2020). Non-continuous reproductive phenology of animal-dispersed species in young forest restoration plantings. *Biotropica*, 53(1), 266–275. <https://doi.org/10.1111/btp.12869>
- Barraqui, N. S. G., Ventura, J., Ruas, F., et al. (2023). Physical and chemical characteristics of *Schinus terebinthifolia* Raddi (Brazilian pepper tree) fruits at different maturation stages. *Biochemical Systematics and Ecology*, 111, 104704. <https://doi.org/10.1016/j.bse.2023.104704>
- Brown, J. K. M., & Tellier, A. (2011). Plant-parasite coevolution: Bridging the gap between genetics and ecology. *Annual Review of Phytopathology*, 49, 345–367. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-072910-095301>
- Graystock, P., Ng, W., Parks, K., et al. (2020). Dominant bee species and floral abundance drive parasite temporal dynamics in plant–pollinator communities. *Nature Ecology & Evolution*, 4(10), 1358–1367. <https://doi.org/10.1038/s41559-020-1247-x>
- Kortet, R., Hedrick, A., & Vainikka, A. (2010). Parasitism, predation and the evolution of animal personalities. *Ecology Letters*, 13(12), 1449–1458. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2010.01536.x>

- Minor, D., & Kobe, R. (2019). Fruit production is influenced by tree size and size-asymmetric crowding in a wet tropical forest. *Ecology and Evolution*, 9(3), 1458–1472. <https://doi.org/10.1002/ece3.4867>
- Ncutirakiza, J. N., Gourlet-Fleury, S., Lejeune, P., et al. (2024). Using high-resolution imagery to analyze the importance of crown size and competition for tropical tree growth. *Forest Ecology and Management*, 552, 121553. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121553>
- Song, X., Li, J., & Zeng, X. (2024). Parameterizing height–diameter and crown radius–diameter relationships worldwide. *Journal of Plant Ecology*, 17(2), rtæ005. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtæ005>
- Tonini, H., Baldoni, A. B., & Botelho, S. C. C. (2020). Estrutura diamétrica e sua relação com a produção de frutos e sementes em um pomar nativo de castanha-do-pará em Mato Grosso. *Floresta*, 50(2), 1399–1410. <https://doi.org/10.5380/rf.v50i2.64199>
- Tonini, H., Kaminski, P. E., & Costa, P. (2008). Relação da produção de sementes de castanha-do-Brasil com características morfométricas da copa e índices de competição. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 43(11), 1509–1516. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2008001100009>

6. CONCLUSÕES GERAIS

- 1) O presente estudo intitulado Manejo de *Megastigmus transvaalensis* (Hymenoptera: Torymidae) e modelagem da produtividade de *Schinus terebinthifolia* (Sapindales: Anacardiaceae) em áreas nativas e restauração, permitiu consolidar estratégias de manejo fitossanitário e modelos preditivos para prever a produtividade de *Schinus terebinthifolia*.
- 2) No manejo fitossanitário, o teste de flutuabilidade demonstrou ser ineficaz como ferramenta diagnóstica de parasitismo, e a exclusão física com agrotêxtil TNT estabeleceu-se como estratégia sustentável de baixo custo, e também por reduzir drasticamente a incidência de *M. transvaalensis* preservando a integridade embrionária das drupas.
- 3) A secagem em temperaturas brandas (30°C/72h) é equivalente aos métodos convencionais (105°C/24h), permitindo a redução da umidade com menor rigor térmico. O modelo hiperbólico é o mais adequado para estimar o teor de umidade assim como para descrever com precisão a redução de massa de *S. terebinthifolia*.
- 4) O vigor da planta dado por Primeiro Componentes Principais (Acopa; DAP e HT) definiu o potencial produtivo, enquanto a carga parasitária inicial ditou o comportamento biótico de todo ciclo.

7. REFERÊNCIAS GERAIS

- Adams, D. C., Soto, J. R., Lai, J., Escobedo, F. J., Alvarez, S., & Kibria, A. S. M. G. (2020). Public preferences and willingness to pay for invasive forest pest prevention programs in urban areas. *Forests*, 11(10), 1056. <https://doi.org/10.3390/f11101056>
- Alonso, J. M., Pereira, R. N., Silva Abel, E. L. D., Ochoski, M., Santos, G. L. D., & Abreu, A. H. M. D. (2022). Sewage sludge as substrate in *Schinus terebinthifolia* Raddi seedlings commercial production. *Scientific Reports*, 12(1), 17245. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21314-0>
- Bairagi, S., Ghosh, S. K., Bhattacharyya, R., & Mondal, M. M. (2016). An overview on test standards for evaluation of jute agrotexiles. *Journal of Applied and Natural Science*, 8(3), 1636–1643. <https://doi.org/10.31018/jans.v8i3.1015>
- Barbado, N., Remor, M. B., Gomes, P. P., Rúbio, F., De Oliveira, R., & Klosowski, É. S. (2021). Effects of altitude on seeds germination and luminosity levels on the vegetative development of *Schinus terebinthifolius* Raddi. *FLORESTA*, 51(4), 830. <https://doi.org/10.5380/rf.v51i4.73306>
- Barraqui, N. S. G., Ventura, J. A., Ruas, F. G., Gomes, R. B. D. A., Lovatti, B. P. O., Silva, S. R. C. D., Filgueiras, P. R., & Kuster, R. M. (2023). Physical and chemical characteristics of *Schinus terebinthifolia* Raddi (Brazilian peppertree) fruits at different stages of maturation. *Biochemical Systematics and Ecology*, 110, 104704. <https://doi.org/10.1016/j.bse.2023.104704>
- Beckage, N. E., & Gelman, D. B. (2004). Wasp parasitoid disruption of host development: Implications for new biologically based strategies for insect control. *Annual Review of Entomology*, 49(1), 299–330. <https://doi.org/10.1146/annurev.ento.49.061802.123324>
- Bennett, A. M. R. (2021). Checklists of the Hymenoptera of Canada, Alaska and Greenland – Introduction. *Journal of Hymenoptera Research*, 82, 1–19. <https://doi.org/10.3897/jhr.82.60054>
- Berjak, P., & Pammenter, N. W. (2007). From *Avicennia* to *Zizania*: Seed recalcitrance in perspective. *Annals of Botany*, 101(2), 213–228. <https://doi.org/10.1093/aob/mcm168>
- Bernardi, J. L., Ferreira, J. A., Puton, B. M. S., Camargo, S. D., Dal Magro, J., Junges, A., Cansian, R. L., Steffens, C., Zeni, J., & Paroul, N. (2024). Potential agrochemical applications of *Schinus*

terebinthifolius essential oil. *Journal of Stored Products Research*, 105, 102260. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2024.102260>

Bezerra, J. J. L. (2022). Usos medicinais de *Schinus terebinthifolia* Raddi (Anacardiaceae) em diferentes regiões do Brasil: uma revisão. *Ethnoscintia - Brazilian Journal of Ethnobiology and Ethnoecology*, 7(1), 88–101. <https://doi.org/10.18542/ethnoscintia.v7i1.10963>

Bierhals, D. F., Henzel, A. B. D., Guarino, E. S. G., Cunha, H. N., Miura, A. K., & Oliveira, I. H. S. (2020). Espécies arbóreas nativas plantadas por agricultores agroflorestais no extremo sul do Brasil. *Cadernos de Agroecologia*, 15(2).

Boivin, T., Rouault, G., Chalon, A., & Candau, J.-N. (2008). Differences in life history strategies between an invasive and a competing resident seed predator. *Biological Invasions*, 10(7), 1013–1025. <https://doi.org/10.1007/s10530-007-9180-3>

Bonsignore, C. P. (2023). Replacement of *Megastigmus pistaciae* Walker (Hymenoptera: Megastigmidae) by *Eurytoma plotnikovi* Nikol'skaya (Hymenoptera: Eurytomidae) in pistachio orchards in Southern Italy. *Phytoparasitica*, 51(5), 1087–1093. <https://doi.org/10.1007/s12600-023-01098-3>

Bowers, K., Hight, S. D., Wheeler, G. S., & Minter, C. R. (2022). Ecological host range of *Pseudophilothrips ichini* (Thysanoptera: Phlaeothripidae), a biological control agent of Brazilian peppertree, *Schinus terebinthifolia*. *Biological Control*, 172, 104976. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2022.104976>

Brasil. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. (2009). *Regras para análise de sementes*. Mapa/ACS.

Brunsek, R., Jugov, N., Marasovic, P., & Mioč, A. (2023). Biodegradation properties of natural fibers for agro textile nonwovens production. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1266(1), 012017. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1266/1/012017>

Byrne, M. J., Mayonde, S., Venter, N., Chidawanyika, F., Zachariades, C., & Martin, G. (2021). Three new biological control programmes for South Africa: Brazilian pepper, Tamarix and Tradescantia. *African Entomology*, 29(3). <https://doi.org/10.4001/003.029.0965>

- Canavan, K., Magengelele, N. L., Paterson, I. D., Williams, D. A., & Martin, G. D. (2022). Uncovering the phylogeography of *Schinus terebinthifolia* in South Africa to guide biological control. *AoB PLANTS*, 14(1), plab078. <https://doi.org/10.1093/aobpla/plab078>
- Carmello-Guerreiro, S. M., & Paoli, A. A. S. (1999). Morfologia e anatomia da semente de *Schinus terebinthifolius* Raddi (Anacardiaceae) em desenvolvimento. *Revista Brasileira de Botânica*, 22(1), 91–98. <https://doi.org/10.1590/S0100-84041999000100012>
- Carmo, I. L. G. S., Medeiros, R. D., Albuquerque, J. A. A., Alvarez, R. A. M., Silva, D. C. V., Sousa, N. V., & Ribeiro, P. R. E. (2023). Melon management using agrotextile and plasticulture and its prospects for Roraima. *Contribuciones a las Ciencias Sociales*, 16(12), 32521–32536. <https://doi.org/10.55905/revconv.16n.12-206>
- Carneiro, M. J., Pinheiro, G. P., Antunes, E. R. M., Hantao, L. W., Moritz, T., & Sawaya, A. C. H. F. (2024). *Schinus terebinthifolia* Raddi—Untargeted metabolomics approach to investigate the chemical variation in volatile and non-volatile compounds. *Metabolites*, 14(11), 612. <https://doi.org/10.3390/metabo14110612>
- Cârpuș, E., Dorogan, A., & Burnichi, F. (2018). Agrotextile systems-strategic elements for sustainable development of the agriculture. In *International Conference on Advanced Materials and Systems (ICAMS)* (pp. 307–311). The National Research & Development Institute for Textiles and Leather-INCDTP.
- Carruthers, K., Cuda, J., Enloe, S., Le Falchier, E., & Minter, C. (2023). Direct toxicity and emigration: Evaluation of herbicide interactions with a biological control agent for Brazilian peppertree (*Schinus terebinthifolia*). *BioControl*, 68(5), 565–578. <https://doi.org/10.1007/s10526-023-10216-3>
- Carvalho, M. G., Melo, A. G. N., Aragão, C. F. S., Raffin, F. N., & Moura, T. F. A. L. (2013). *Schinus terebinthifolius* Raddi: Chemical composition, biological properties and toxicity. *Revista Brasileira de Plantas Medicinais*, 15(1), 158–169. <https://doi.org/10.1590/S1516-05722013000100022>
- Carvalho, P. E. R. (1994). *Espécies florestais brasileiras: recomendações silviculturais, potencialidades e uso da madeira*. EMBRAPA-CNPQ.

- Cassani, J. R. (1986). Arthropods on Brazilian peppertree, *Schinus terebinthifolius* (Anacardiaceae), in South Florida. *Florida Entomologist*, 69(1), 184–196. <https://doi.org/10.2307/3494754>
- Cesário, L. F., & Gaglianone, M. C. (2013). Polinizadores de *Schinus terebinthifolius* Raddi (Anacardiaceae) em formações vegetacionais de restinga no norte do estado do Rio de Janeiro. *Bioscience Journal*, 29(2), 458–467.
- Chowdhury, M. J., Nasrin, S., & Al Faruque, M. A. (2017). Significance of agro-textiles and future prospects in Bangladesh. *European Scientific Journal*, ESJ, 13(21), 139. <https://doi.org/10.19044/esj.2017.v13n21p139>
- Chowdhury, M. J., Nasrin, S., & Faruque, M. A. A. (2017). Significance of agro-textiles and future prospects in Bangladesh. *European Scientific Journal*, ESJ, 13(21), 139. <https://doi.org/10.19044/esj.2017.v13n21p139>
- Cuda, J. P., Ferriter, A. P., Manrique, V., & Medal, J. C. (2006). *Interagency Brazilian peppertree (Schinus terebinthifolius) management plan for Florida 2nd edition*. Florida Exotic Pest Plant Council.
- Cuda, J. P., Gillmore, J. L., & Garcete-Barrett, B. R. (2018). Effect of plant sex (dioecism) on the performance of *Apocnemidophorus pipitzi* (Coleoptera: Curculionidae), a stem boring weevil of Brazilian peppertree, *Schinus terebinthifolia*. *Florida Entomologist*, 101(1), 135–137. <https://doi.org/10.1653/024.101.0125>
- Cuda, J. P., Vitorino, M. D., Bini, L., Boeno, M. M., & van Senten, E. (2022). Native range efficacy assessment of *Calophya terebinthifolia* candidate biological control agent of *Schinus terebinthifolia* in Florida, USA. *Advances in Weed Science*, 40, e020220011. <https://doi.org/10.51694/AdvWeedSci/2022;40:00011>
- Cuda, J. P., Wheeler, G. S., & Habeck, D. H. (2002). Brazilian peppertree seed wasp, *Megastigmus transvaalensis* (Hymenoptera: Torymidae). University of Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences.
- Cuda, J. P., Wheeler, G. S., & Habeck, D. H. (2011). Brazilian peppertree seed chalcid, *Megastigmus transvaalensis* (Hymenoptera: Torymidae). University of Florida.

- Cuny, M. A. C., Bourne, M. E., Dicke, M., & Poelman, E. H. (2021). The enemy of my enemy is not always my friend: Negative effects of carnivorous arthropods on plants. *Functional Ecology*, 35(11), 2365–2375. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13884>
- Dalponte, M., Frizzera, L., Ørka, H. O., Gobakken, T., Næsset, E., & Gianelle, D. (2018). Predicting stem diameters and aboveground biomass of individual trees using remote sensing data. *Ecological Indicators*, 85, 367–376. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.10.066>
- Dantas, M. S. M., Grangeiro, L. C., Medeiros, J. F., Cruz, C. A., & Cunha, A. (2013). Rendimento e qualidade de melancia cultivada sob proteção de agrotêxtil combinado com mulching plástico. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 17(8), 824–829. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000800004>
- de Brito Marques Ramos, D., Araújo, M. T. M. F., Araújo, T. C. L., Neto, O. G. S., Silva, M. G., Silva, Y. A., ... & Napoleão, T. H. (2019). Avaliação da atividade antitumoral e toxicidade do extrato de folha de *Schinus terebinthifolia* e lectina (SteLL) em camundongos portadores de sarcoma 180. *Journal of Ethnopharmacology*, 233, 148–157. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2019.01.011>
- de Souza, E. M. S., Álvares-Carvalho, S. V., Ferreira, R. A., & Silva-Mann, R. (2022). *Schinus terebinthifolia* Raddi: A comparative framework on population genetic structure in a restored area after 12 years. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 69(7), 2459–2467. <https://doi.org/10.1007/s10722-022-01384-9>
- de Souza, E. V., Andrade, G. C., Araújo, H. H., & Dias-Pereira, J. (2022). Structural plasticity in leaves of *Schinus terebinthifolius* (Anacardiaceae) populations from three contrasting tropical ecosystems. *The Journal of the Torrey Botanical Society*, 149(3), 200–211. <https://doi.org/10.3159/TORREY-D-22-00001.1>
- Degáspari, C. H., Waszczynskyj, N., & Prado, M. R. M. (2005). Antimicrobial activity of *Schinus terebinthifolius* Raddi. *Ciência e Agrotecnologia*, 29(3), 617–622.
- Doğanlar, M., Zaché, B., & Wilcken, C. F. (2013). A new species of *Megastigmus* (Hymenoptera: Torymidae: Megastigminae) from Brazil. *Florida Entomologist*, 96(1), 196–199. <https://doi.org/10.1653/024.096.0126>

- Dorugade, V., Taye, M., Qureshi, S. A., Agazie, T., Seyoum, B., Abebe, B., & Komarabathina, S. (2023). Agrotexiles: Important characteristics of fibres and their applications – a review. *Journal of Natural Fibers*, 20(2), 2211290. <https://doi.org/10.1080/15440478.2023.2211290>
- dos Santos Cavalcanti, A., Alves, M. S., Silva, L. C. P., Patrocínio, D. S., Sanches, M. N., Chaves, D. S. A., & Souza, M. A. A. (2015). Volatiles composition and extraction kinetics from *Schinus terebinthifolius* and *Schinus molle* leaves and fruit. *Revista Brasileira de Farmacognosia*, 25(4), 356–362. <https://doi.org/10.1016/j.bjp.2015.07.003>
- Dragumilo, A., Marković, T., Vrbničanin, S., Prijić, Ž., Mrđan, S., Radanović, D., & Božić, D. (2023). Weed suppression by mulches in *Mentha x piperita* L. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 35, 100499. <https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2023.100499>
- Dutra, F. B., Francisco, B. S., Almeida, L. S., Santos, I. P., Viveiros, E., Martins, R. P., ... & Silva, J. M. S. (2021). Minicutting technique and IBA application in vegetative propagation of *Schinus terebinthifolia* Raddi. *Research, Society and Development*, 10(14), e553101422610. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i14.22610>
- Enloe, S. F., Leary, J. K., Prince, C. M., Sperry, B. P., & Lauer, D. K. (2021). Response of Brazilian peppertree (*Schinus terebinthifolia*) and four mangrove species to imazamox and carfentrazone-ethyl herbicides. *Invasive Plant Science and Management*, 14(3), 190–195. <https://doi.org/10.1017/inp.2021.22>
- Fernandes, D. R. R., Salas, C., Rothmann, S., Lara, R. I. R., & Perioto, N. W. (2014). *Megastigmus transvaalensis* (Hymenoptera: Torymidae) on *Schinus polygamus* (Anacardiaceae): A new native host for this invasive seed-feeding species. *Idesia (Arica)*, 32(4), 119–122. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292014000400016>
- Fernández, F. (2022). On the diversity of Neotropical Hymenoptera. *Caldasia*, 44(3), 502–513. <https://doi.org/10.15446/caldasia.v44n3.94286>
- Ferreira Filho, P. J., Wilcken, C. F., de Oliveira, N. C., Dal Pogetto, M. H. F. A., & Lima, A. C. V. (2008). Dinâmica populacional do psíldeo-de-concha *Glycaspis brimblecombei* (Moore, 1964) (Hemiptera: Psyllidae) e de seu parasitóide *Psyllaephagus bliteus* (Hymenoptera: Encyrtidae) em

floresta de *Eucalyptus camaldulensis*. *Ciência Rural*, 38(8), 2109–2114.
<https://doi.org/10.1590/S0103-84782008000800003>

Ferreira-Filho, P. J., Piña-Rodrigues, F. C. M., Silva, J. M. S., Guerreiro, J. C., Ghiotto, T. C., Piotrowski, I., ... & Zanuncio, J. C. (2015). The exotic wasp *Megastigmus transvaalensis* (Hymenoptera: Torymidae): First record and damage on the Brazilian peppertree, *Schinus terebinthifolius* drupes, in São Paulo, Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 87(4), 2091–2095. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201520140478>

Filazzola, A., Matter, S. F., & MacIvor, J. S. (2021). The direct and indirect effects of extreme climate events on insects. *Science of The Total Environment*, 769, 145161.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145161>

Freitas, T. C., Guarino, E. S. G., Gomes, G. C., Molina, A. R., Real, I. M. L., & Beltrame, R. (2020). The effect of seed ingestion by a native, generalist bird on the germination of worldwide potentially invasive trees species *Pittosporum undulatum* and *Schinus terebinthifolia*. *Acta Oecologica*, 108, 103639. <https://doi.org/10.1016/j.actao.2020.103639>

Ganeshan, S., & Madl, M. (2015). Notes on *Megastigmus transvaalensis* (Hussay, 1956) in Mauritius (Hymenoptera: Chalcidoidea: Torymidae). *Linzer biologische Beiträge*, 47(1), 79–81.

Ghiotto, T. C., Prado, M. C. N., Giuliani, G. K. F., Tavares, W. S., Masson, M. V., Guerreiro, J. C., ... & Ferreira-Filho, P. J. (2019). *Megastigmus* seed wasp damage on native *Schinus terebinthifolia* drupes in ecological restoration area in Brazil. *Scientific Reports*, 9(1), 2438.
<https://doi.org/10.1038/s41598-019-39129-x>

Gomes, L. J., Silva-Mann, R., Mattos, P. P., & Rabbani, A. R. C. (2013). *Pensando a biodiversidade: Aroeira (Schinus terebinthifolius Raddi.)*. Editora UFS.

Gomes, R. B. A., Souza, E. S., Barraqui, N. S. G., Tosta, C. L., Nunes, A. P. F., Schuenck, R. P., ... & Kuster, R. M. (2020). Residues from the Brazilian pepper tree (*Schinus terebinthifolia* Raddi) processing industry: Chemical profile and antimicrobial activity of extracts against hospital bacteria. *Industrial Crops and Products*, 143, 111430.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.05.079>

- Governici, J. L., Sperotto, N. C. Z., Melo, E. C., Gonzaga, D. A., & Carneiro, A. P. S. (2020). Drying and essential oil extraction of Brazilian peppertree (*Schinus terebinthifolius* Raddi) fruits. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 24(9), 637–643. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v24n9p637-643>
- Grissell, E. E., & Prinsloo, G. L. (2001). Seed-feeding species of *Megastigmus* (Hymenoptera: Torymidae) associated with Anacardiaceae. *Journal of Hymenoptera Research*, 10 (1), 33–46.
- Guedri, W., Jaoudi, M., & Msahli, S. (2022). Evaluating farmer's satisfaction of different agrotexile bunch covers using desirability function. *Textile Research Journal*, 92(17–18), 3337–3350. <https://doi.org/10.1177/00405175211006945>
- Habeck, D. H., Bennett, F. D., & Grissell, E. E. (1989). First record of a phytophagous seed chalcid from Brazilian peppertree in Florida. *The Florida Entomologist*, 72 (2), 378–379.
- Hogg, B. N., Stokes, K., Rayamajhi, M. B., Geiger, J., & Pratt, P. D. (2020). Foliar lifespan, phenology and seasonal dynamics of the invasive shrub *Schinus terebinthifolia*. *Weed Research*, 60 (3), 212–220. <https://doi.org/10.1111/wre.12414>
- Incapar. (2016). Aroeira: Um nicho de mercado em expansão na economia capixaba. Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural.
- Jansen-González, S. (2013). Estratégias de utilização de sementes como recurso alimentar em Chalcidoidea (Hymenoptera). Tese de Doutorado]. Universidade de São Paulo.
- Jansen-González, S., Teixeira, S. P., & Pereira, R. A. S. (2012). Mutualism from the inside: Coordinated development of plant and insect in an active pollinating fig wasp. *Arthropod-Plant Interactions*, 6(4), 601–609. <https://doi.org/10.1007/s11829-012-9203-6>
- Jansen-González, S., Teixeira, S. P., & Pereira, R. A. S. (2020). Larval strategy of two species of seed-feeding Chalcidoidea parallels that of parasitoid koinobionts. *Oecologia Australis*, 24 (4), 903–916. <https://doi.org/10.4257/OECO.2020.2404.13>
- Janšta, P., Cruaud, A., Delvare, G., Genson, G., Heraty, J., Křížková, B., & Rasplus, J. Y. (2018). Torymidae (Hymenoptera, Chalcidoidea) revised: Molecular phylogeny, circumscription and reclassification of the family with discussion of its biogeography and evolution of life-history traits. *Cladistics*, 34(6), 627–651. <https://doi.org/10.1111/cla.12228>

- Khramov, R., Kosobryukhov, A., Kreslavski, V., Balakirev, D., Khudyakova, A., Svidchenko, E., ... & Luponosov, Y. (2022). Luminescence of agrotexiles based on red-light-emitting organic luminophore and polypropylene spunbond enhances the growth and photosynthesis of vegetable plants. *Frontiers in Plant Science*, 13, 827679. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.827679>
- Kopitar, D., Marasovic, P., Jugov, N., & Schwarz, I. (2022). Biodegradable nonwoven agrotexile and films—A review. *Polymers*, 14(11), 2272. <https://doi.org/10.3390/polym14112272>
- Kuang, J. G., Han, Z. T., Kang, M. H., Ju, T., Tso, S., Chen, X. X., Li, J. L., Xiong, Z. P., Ma, T., & Mao, K. S. (2023). Chromosome-level de novo genome assembly of two conifer-parasitic wasps, *Megastigmus duclouxiana* and *Megastigmus sabinae*, reveals genomic imprints of adaptation to hosts. *Molecular Ecology Resources*, 23(5), 1142–1154. <https://doi.org/10.1111/1755-0998.13785>
- Kweka, E. J., Nyindo, M., Mosha, F., & Silva, A. G. (2011). Insecticidal activity of the essential oil from fruits and seeds of *Schinus terebinthifolia* Raddi against African malaria vectors. *Parasites & Vectors*, 4(1), 129. <https://doi.org/10.1186/1756-3305-4-129>
- Lazarević, J., Vrbničanin, S., Dragumilo, A., Marković, T., Pejčev, R. Đ., Nikolić, S. R., & Božić, D. (2024). Analysis of the effects of organic and synthetic mulching films on the weed, root yield, essential oil yield, and chemical composition of *Angelica archangelica* L. *Horticulturae*, 10(11), 1199. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10111199>
- Le Falchier, E. J., Campbell, L., Halbritter, D., Wheeler, G. S., Leidi, J., Williams, D., ... & Minter, C. R. (2025). Predição de habitats adequados para o agente de controle biológico da aroeira brasileira *Pseudophilothrips ichini* (Thysanoptera: Phlaeothripidae) na Flórida. *Biocontrol Science and Technology*, 35(3), 338–355. <https://doi.org/10.1080/09583157.2025.2452878>
- Lediuk, K. D., Damascos, M. A., & Kun, M. E. (2012). Infestación de *Megastigmus aculeatus* (Hymenoptera: Chalcidoidea) en las semillas de rosas exóticas invasoras de comunidades naturales de la Patagonia Andina de Argentina. *Revista Chilena de Historia Natural*, 85(1), 147–154. <https://doi.org/10.4067/S0716-078X2012000100012>

- Lenzi, M., & Orth, A. I. (2004a). Caracterização funcional do sistema reprodutivo da aroeira-vermelha (*Schinus terebinthifolius* Raddi), em Florianópolis-SC, Brasil. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 26(2), 198–201. <https://doi.org/10.1590/S0100-29452004000200004>
- Lenzi, M., & Orth, A. I. (2004b). Fenologia reprodutiva, morfologia e biologia floral de *Schinus terebinthifolius* Raddi (Anacardiaceae), em restinga da Ilha de Santa Catarina, Brasil. *Biotemas*, 17 (2), 67–89.
- Machado, A. P., Louis, J., & Bendaoud, M. (2024). Abstract 1210: Antibiofilm and antimicrobial properties of *Schinus terebinthifolia* fruit extract. *Journal of Biological Chemistry*, 300(3), 106069. <https://doi.org/10.1016/j.jbc.2024.106069>
- Mack, R. N. (1991). The commercial seed trade: An early disperser of weeds in the United States. *Economic Botany*, 45(2), 257–273.
- Magengelele, N., & Martin, G. (2023). Distribution and impact of the native South African wasp, *Megastigmus transvaalensis* (Hussey, 1956) (Hymenoptera: Torymidae) on the invasive *Schinus terebinthifolia* Raddi (Anacardiaceae) in South Africa. *African Entomology*, 31, e13583. <https://doi.org/10.17159/2254-8854/2023/a13583>
- Maia, M. C. R., Laurentino, C. S., Carneiro, G. A., Muniz, I. C. S., Muniz, I. I. S., Silva, I. A., ... & Cordeiro, R. P. (2021). Propriedades terapêuticas da espécie *Schinus terebinthifolius* Raddi (Aroeira-Vermelha). *Revista Eletrônica Acervo Saúde*, 13(4), e6791. <https://doi.org/10.25248/reas.e6791.2021>
- Manna, K., Kundu, M. C., Saha, B., & Ghosh, G. K. (2018). Effect of nonwoven jute agrotexile mulch on soil health and productivity of broccoli (*Brassica oleracea* L.) in lateritic soil. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(2), 82. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6452-y>
- Marasović, P., & Kopitar, D. (2019). Overview and perspective of nonwoven agrotexile. *Textile & Leather Review*, 2(1), 32–45. <https://doi.org/10.31881/TLR.2019.23>
- Martin, G. D., Magengelele, N. L., Paterson, I. D., & Sutton, G. F. (2020). Climate modelling suggests a review of the legal status of Brazilian pepper *Schinus terebinthifolia* in South Africa is required. *South African Journal of Botany*, 132, 95–102. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2020.04.019>

- Martins, C. F., Santos Junior, W. A. C., Silva, L. de S., & de Paula, J. R. (2021). *Schinus terebinthifolius* Raddi: Scientometric analysis. *Research, Society and Development*, 10(8), e11110817016. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i8.17016>
- Martínez Guerra, M. J., López Barreiro, M., Morejón Rodríguez, Z., & Rubalcaba, Y. (2000). Actividad antimicrobiana de un extracto fluido al 80% de *Schinus terebinthifolius* Raddi (Copal). *Revista Cubana de Plantas Medicinales*, 5(1), 23–25.
- McKay, F., Oleiro, M., Walsh, G. C., Gandolfo, D., Cuda, J. P., & Wheeler, G. S. (2009). Natural enemies of Brazilian peppertree (Sapindales: Anacardiaceae) from Argentina: Their possible use for biological control in the USA. *Florida Entomologist*, 92(2), 292–303. <https://doi.org/10.1653/024.092.0213>
- McKViay, F., Dellapé, G., Dyer, K., & Wheeler, G. S. (2019). Nuevo registro de *Brontocoris tabidus* (Hemiptera: Pentatomidae) atacando larvas de *Heteroperreya hubrichi* (Hymenoptera: Pergidae). *Revista de la Sociedad Entomológica Argentina*, 78(2), 1–5.
- Medal, J. C., Vitorino, M. D., Habeck, D. H., Gillmore, J. L., Pedrosa, J. H., & De Sousa, L. P. (1999). Host specificity of *Heteroperreya hubrichi* Malaise (Hymenoptera: Pergidae), a potential biological control agent of Brazilian peppertree (*Schinus terebinthifolius* Raddi). *Biological Control*, 14(1), 60–65. <https://doi.org/10.1006/bcon.1998.0670>
- Medeiros, E. V. de, Serafim, E. C. da S., Granjeiro, L. C., Sobrinho, J. E., Negreiros, M. Z. de, & Sales Júnior, R. (2008). Influência do agrotêxtil sobre a densidade populacional de *Monosporascus cannonballus* em solo cultivado com melancia (*Citrullus lanatus*). *Ciência e Agrotecnologia*, 32(3), 797–803. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542008000300013>
- Medeiros, J. F. de, Santos, S. C. L., Câmara, M. J. T., & Negreiros, M. Z. de. (2007). Produção de melão Cantaloupe influenciado por coberturas do solo, agrotêxtil e lâminas de irrigação. *Horticultura Brasileira*, 25(4), 538–543. <https://doi.org/10.1590/S0102-05362007000400009>
- Melo, G. A. R., & Dal Molin, A. (2024). Hymenoptera Linnaeus, 1758. In *Insetos do Brasil: Diversidade e Taxonomia* (2ª ed., cap. 27).
- Miller, K. E., Andrew, P., & Evans, D. M. (2021). A dearth of data: Fitting parasitoids into ecological networks. *Trends in Parasitology*, 37(10), 863–874. <https://doi.org/10.1016/j.pt.2021.04.012>

- Mytinger, L., & Williamson, G. B. (1987). The invasion of *Schinus* into saline communities of Everglades National Park. *Florida Scientist*, 50(1), 7–12.
- Nestlé, R., Palacios, J., David, A. S., Read, Q. D., & Wheeler, G. S. (2023). O agente de controle biológico da aroeira-brasileira, *Pseudophlothrips ichini* (Thysanoptera: Phlaeothripidae), apresenta uma estratégia de alimentação flexível entre a folhagem e os tecidos reprodutivos. *Controle Biológico*, 179, 105159. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2023.105159>
- Neves, E. J. M., Santos, A. M., Gomes, J. B. V., Ruas, F. G., & Ventura, J. A. (2016). Cultivo da aroeira-vermelha (*Schinus terebinthifolius* Raddi) para produção de pimenta-rosa. Embrapa Florestas.
- Nocchi, S. R., Ferreira, L. A. O., Castro-Hoshino, L. V., Truiti, M. C. T., Natali, M. R. M., Palazzo de Mello, J. C., Baesso, M. L., Dias Filho, B. P., Nakamura, C. V., & Ueda-Nakamura, T. (2022). Development and evaluation of topical formulations that contain hydroethanolic extract from *Schinus terebinthifolia* against HSV-1 infection. *Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences*, 58. <https://doi.org/10.1590/s2175-97902020000318637>
- Noyes, J. S. (2003). *Universal Chalcidoidea Database*. Natural History Museum.
- Noyes, J. S. (2019). *Universal Chalcidoidea Database*. Natural History Museum.
- Nunes, Y. R. F., Fagundes, M., Almeida, H. S., & Veloso, M. D. M. (2008). Aspectos ecológicos da aroeira (*Myracrodruon urundeuva* Allemão- Anacardiaceae): Fenologia e germinação de sementes. *Revista Árvore*, 32(2), 233–243. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622008000200006>
- Oliveira, W., Colares, L. F., Porto, R. G., Viana, B. F., Tabarelli, M., & Lopes, A. V. (2024). Food plants in Brazil: Origin, economic value of pollination and pollinator shortage risk. *Science of The Total Environment*, 912, 169147. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169147>
- Panetta, F. D., & McKee, J. (1997). Recruitment of the invasive ornamental, *Schinus terebinthifolius*, is dependent upon frugivores. *Australian Journal of Ecology*. 22(4), 432–438. <https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.1997.tb00694.x>
- Pennacchio, F., & Strand, M. R. (2006). Evolution of developmental strategies in parasitic Hymenoptera. *Annual Review of Entomology*, 51(1), 233–258. <https://doi.org/10.1146/annurev.ento.51.110104.151029>

- Perioto, N. W. (1999). Primeiro registro do gênero *Megastigmus* Dalman, 1820 (Hymenoptera: Torymidae) e primeiro registro para a subfamília Megastigminae do Brasil. *Arquivos do Instituto Biológico*, 64, 115–116.
- Pireda, S., Marques, J. de B. C., Rabelo, G. R., & Da Cunha, M. (2017). Structural analysis and developmental stages of domatia of *Schinus terebinthifolius* Raddi (Anacardiaceae). *Brazilian Journal of Botany*, 40(4), 1041–1048. <https://doi.org/10.1007/s40415-017-0414-z>
- Ponce, F. S., Trento, D. A., de Lima Toledo, C. A., Antunes, D. T., Zanuzo, M. R., Dallacort, R., Oliveira, R. C., & Seabra, S. (2021). Low tunnels with shading meshes: An alternative for the management of insect pests in kale cultivation. *Scientia Horticulturae*, 288, 110284. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110284>
- Popescu, I. E., & Gostin, I. N. (2023). A new species of *Megastigmus* and first record of the genus and Megastigmidae family from the paradise of the Maldives archipelago. *Insects*, 14(8), 677. <https://doi.org/10.3390/insects14080677>
- Pratti, D. L. A., Ramos, A. C., Scherer, R., Cruz, Z. M. A., & Silva, A. G. (2015). Mechanistic basis for morphological damage induced by essential oil from Brazilian pepper tree, *Schinus terebinthifolia*, on larvae of *Stegomyia aegypti*, the dengue vector. *Parasites & Vectors*, 8(1), 136. <https://doi.org/10.1186/s13071-015-0746-0>
- Querino, R. B., Couceiro, S. R. M., Queiroz, L. O., & Penteado-Dias, A. M. (2011). The spatial distribution of Hymenoptera parasitoids in a forest reserve in Central Amazonia, Manaus, AM, Brazil. *Brazilian Journal of Biology*, 71(4), 865–871. <https://doi.org/10.1590/S1519-69842011000500007>
- Ramos, D. D., Romero, L. H. M., Ajalla, A. C. A., Carnevali, T. O., Inocêncio, H. J., & Santos, F. A. (2020). Desempenho de *Schinus terebinthifolia* em sucessão a plantas de cobertura. *Research, Society and Development*, 9(10), e2169108475. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i10.8475>
- Ramos, H. O., Ferreira, G. G., Brandão, D. L. N., & Dolabela, M. F. (2022). *Schinus terebinthifolius* Raddi: Uma revisão bibliográfica associada a um estudo in silico. *Research, Society and Development*, 11(12), e421111234262. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i12.34262>

- Rasplus, J.-Y., Villemant, C., Paiva, M. R., Delvare, G., & Roques, A. (2010). Hymenoptera. Chapter 12. *BioRisk*, 4, 669–776. <https://doi.org/10.3897/biorisk.4.55>
- Rekika, D., Stewart, K. A., Boivin, G., & Jenni, S. (2008). Floating rowcovers improve germination and reduce carrot weevil infestations in carrot. *HortScience*, 43(5), 1619–1622. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.43.5.1619>
- Restrepo-Osorio, A., Álvarez-López, C., Jaramillo-Quiceno, N., & Fernández-Morales, P. (2019). Agrotexiles and crop protection textiles. In *High Performance Technical Textiles* (pp. 279–318). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119325017.ch10>
- Ribeiro, R. C., Figueiredo, M. L. N., Picorelli, A., & Silveira, F. A. O. (2023). Limited seed dispersal distance in endemic species from tropical mountaintop grasslands may restrict upward migration in response to climate change. *Flora*, 298, 152203. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2022.152203>
- Rojas-Sandoval, J., & Acevedo-Rodríguez, P. (2022). *Schinus terebinthifolius* (Brazilian pepper tree). *CABI Compendium*.
- Roques, A., Copeland, R. S., Soldati, L., Denux, O., & Auger-Rozenberg, M.-A. (2016). *Megastigmus* seed chalcids (Hymenoptera, Torymidae) radiated much more on angiosperms than previously considered. I- Description of 8 new species from Kenya, with a key to the females of Eastern and Southern Africa. *ZooKeys*, 585, 51–124. <https://doi.org/10.3897/zookeys.585.7503>
- Ruas, F. G., Ventura, J. A., & Dias, G. F. B. (2021). Indicação de procedência ‘São Mateus’ para a pimenta-rosa no Espírito Santo. *Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural*, 11(12), 79–98. <https://doi.org/10.54682/ier.v11e12-p79-98>
- Ruíz-Cancino, E., Coronado-Blanco, J. M., & García-Jiménez, J. (2011). *Megastigmus transvaalensis* (Hussey) (Hymenoptera: Chalcidoidea) es la especie de Torymidae que ataca al pirul en México. *Colegio de Postgraduados*.
- Santos, B. C., Martins, D. S., Ventura, J. A., Ruas, F. G., Culik, M. P., & Fornazier, M. J. (2017). Ocorrência da vespa *Megastigmus transvaalensis* (Hussey) (Hymenoptera: Torymidae) em frutos de aroeira no estado do Espírito Santo. In *II SICT do Incaper*.

- Santos, R. S., Santos, P. C. S., Carvalho Junior, C. R. N., Leite, J. A., Silva, M. A. D., Pereira, H. N., & Gallo, R. (2024). Floral morphometry and sexual system determination in pink pepper (*Schinus terebinthifolia*- Anacardiaceae). *Brazilian Journal of Biology*, 84. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.278836>
- Scarlat, R., Pricop, F., & Rusu, L. (2017). Knitted agrotexiles for a sustainable agriculture. *Industria Textila*, 68(5), 332–336. <https://doi.org/10.35530/IT.068.05.1413>
- Scheffer, S. J., & Grissell, E. E. (2003). Tracing the geographical origin of *Megastigmus transvaalensis* (Hymenoptera: Torymidae): An African wasp feeding on a South American plant in North America. *Molecular Ecology*, 12(2), 415–421. <https://doi.org/10.1046/j.1365-294X.2003.01725.x>
- Schimitberger, V. M. B., Pratti, D. L. A., Cavalcanti, L. C., Ramalho, V. F., Costa, A. P. F., Scherer, R., Kuster, R. M., Ramos, A. C., & Silva, A. G. (2018). Volatile compounds profile changes from unripe to ripe fruits of Brazilian pepper (*Schinus terebinthifolia* Raddi). *Industrial Crops and Products*, 119, 125–131. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.04.011>
- Siqueira, M. C., Kanashiro, S., Domingos, M., Rinaldi, M. C. S., & Tavares, A. R. (2021). The dynamics of macro- and micronutrients in native tree species affected by copper contamination. *Floresta e Ambiente*, 28(4), 2–11. <https://doi.org/10.1590/2179-8087-FLORAM-2021-0036>
- Soares, J. J., do Nascimento, A. R. B., Silva Filho, J. L., & Silva, M. V. (2011). População de artrópodes benéficos em algodoeiro afetado por inseticidas em sistemas de manejo integrado e convencional. *Arquivos do Instituto Biológico*, 78(1), 147–150. <https://doi.org/10.1590/1808-1657v78p1472011>
- Spector, T., & Putz, F. E. (2006). Biomechanical plasticity facilitates invasion of maritime forests in the southern USA by Brazilian pepper (*Schinus terebinthifolius*). *Biological Invasions*, 8(2), 255–260. <https://doi.org/10.1007/s10530-004-5571-x>
- Srivastava, P. K., & Sit, N. (2024). Mathematical and ANN modelling for convective drying of Spanish cherry seeds: Bioactive degradation, energy efficiency, and mass transfer evaluation. *Food Biophysics*, 20(1), 12. <https://doi.org/10.1007/s11483-024-09898-8>

- Stoeck, T. (2021). Methodology of testing common rail fuel injectors with the use of Gauss's formulas. *Combustion Engines*, 184(1), 11–15. <https://doi.org/10.19206/CE-133505>
- Sun, Y., Wang, X., Zhang, C., & Zuo, M. (2023). Multiple regression: Methodology and applications. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 49, 542–548. <https://doi.org/10.54097/hset.v49i.8611>
- Teixeira, R., do Amarante, C. V. T., Boff, M. I. C., & Ribeiro, L. G. (2011). Controle de pragas e doenças, maturação e qualidade de maçãs ‘imperial Gala’ submetidas ao ensacamento. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 33(2), 394–401. <https://doi.org/10.1590/S0100-29452011005000066>
- Telmadarrehei, T., Riley, S., & Minter, C. R. (2025). Avaliação do desenvolvimento de *Pseudophilothrips ichini* (Hood) quando criado em aroeira brasileira cultivada em ambientes salobros. *Biocontrol Science and Technology*, 35(3), 278–292. <https://doi.org/10.1080/09583157.2024.2443176>
- Treadwell, L. W., & Cuda, J. P. (2007). Effects of defoliation on growth and reproduction of Brazilian peppertree (*Schinus terebinthifolius*). *Weed Science*, 55(2), 137–142. <https://doi.org/10.1614/WS-06-086.1>
- Valicente, F. H., Dantas, C. L., Resende, J. P. V., Paiva, P. M., Souza, C. F., Nascimento, P. T., Oliveira, C. R., Boregas, K. G. B., Rodriguez-Dimaté, F. A., & Aguiar, F. M. (2022). Monitoramento de campo de 6 anos da lagarta do funil do milho, *Spodoptera frugiperda*, em milho Bt transgênico no Brasil. *Revista Brasileira de Entomologia*, 66(2), e20210121. <https://doi.org/10.1590/1806-9665-RBENT-2021-012>
- Vasconcelos, P. G. S., Alves, É. P., Maia, C. M. A., Brito, A. C. M., Silva, D. R., Freires, I. A., Cavalcanti, Y. W., Rehder, V. L. G., Ruiz, A. L. T. G., Duarte, M. C. T., Rosalen, P. L., Godoy, G. P., & Costa, E. M. M. B. (2022). Biological properties of *Schinus terebinthifolia* Raddi essential oil. *Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences*, 58. <https://doi.org/10.1590/s2175-97902021000x2e20417>
- Velasques, J., Crispim, B. A., de Vasconcelos, A. A., Bajay, M. M., Cardoso, C. A. L., Barufatti, A., & Vieira, M. C. (2021). Genetic and chemodiversity in native populations of *Schinus*

- terebinthifolia* Raddi along the Brazilian Atlantic Forest. *Scientific Reports*, 11(1), 20487. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-00015-0>
- Villegas R., D. A., Valbuena, N., & Milla P., M. E. (2019). Evaluación de modelos aplicados a la producción de materia seca de *Brachiaria brizantha* en el periodo lluvioso. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 36(1), 33–45. <https://doi.org/10.22267/rcia.193601.96>
- Von Aderkas, P., Rouault, G., Wagner, R., Rohr, R., & Roques, A. (2005). Seed parasitism redirects ovule development in Douglas fir. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 272(1571), 1491–1496. <https://doi.org/10.1098/rspb.2005.3061>
- Westwood, J. H., Yoder, J. I., Timko, M. P., & dePamphilis, C. W. (2010). The evolution of parasitism in plants. *Trends in Plant Science*, 15(4), 227–235. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2010.01.004>
- Wheeler, G. S., Massey, L. M., & Endries, M. (2001). The Brazilian peppertree drupe feeder *Megastigmus transvaalensis* (Hymenoptera: Torymidae): Florida distribution and impact. *Biological Control*, 22(2), 139–148. <https://doi.org/10.1006/bcon.2001.0968>
- Wheeler, G. S., McKay, F., Vitorino, M. D., Manrique, V., Diaz, R., & Overholt, W. A. (2016). Biological control of the invasive weed *Schinus terebinthifolia* (Brazilian peppertree): A review of the project with an update on the proposed agents. *Southeastern Naturalist*, 15(sp8), 15–34. <https://doi.org/10.1656/058.015.sp802>
- Wheeler, G. S., Minter, C. R., Palacios, J., Halbritter, D. A., & David, A. S. (2024). Pruning Brazilian peppertrees to augment field populations of the biological control agent *Pseudophilothrips ichini*. *Biological Control*, 195, 105550. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2024.105550>
- Wilkomm, V. E., Ramos, D. D., Zarate, N. A. H., & Vieira, M. C. (2024). Cultivation of pink pepper in succession to cover crops and bokashi application. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 28(7). <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v28n7e278539>
- Wyckoff, P. H., & Clark, J. S. (2005). Tree growth prediction using size and exposed crown area. *Canadian Journal of Forest Research*, 35(1), 13–20. <https://doi.org/10.1139/x04-142>

- Yang, P., Fu, H., Sun, P., Ren, L., Zheng, Z., Xu, J., Lv, L., Liang, Q., & Yang, D. (2024). Shell structure impacts *Camellia oleifera* fruit splitting during dehydration. *Food and Bioprocess Processing*, 148, 298–308. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2024.09.006>
- You, L. L., Wu, Y., Xu, B., Ding, J., Ge, L. Q., Yang, G. Q., Song, Q. S., Stanley, D., & Wu, J. C. (2016). Driving pest insect populations: Agricultural chemicals lead to an adaptive syndrome in *Nilaparvata lugens* Stål (Hemiptera: Delphacidae). *Scientific Reports*, 6(1), 37430. <https://doi.org/10.1038/srep37430>
- Yun, J., Kim, S., & Kim, J. (2024). Digital twin technology in the gas industry: A comparative simulation study. *Sustainability*, 16(14), 5864. <https://doi.org/10.3390/su16145864>
- Zavistanovicz, T. C., Araujo, M. M., Aimi, S. C., Berghetti, Á. L. P., Costella, C., & da Silva, M. R. (2024). Survival and initial growth of seedlings produced in different containers and the use of mulching in anthropized area. *Revista Árvore*, 49(1), 1–11. <https://doi.org/10.53661/1806-9088202549263812>
- Zhang, Y., Tian, X., Wang, H., Casteñé, C., Arnó, J., Collatz, J., Romeis, J., Wu, S., Xian, X., Liu, W., Wan, F., & Zhang, G. (2022). Host selection behavior of the host-feeding parasitoid *Necremnus tutae* on *Tuta absoluta*. *Entomologia Generalis*, 42(3), 445–456. <https://doi.org/10.1127/entomologia/2021/1246>

8. APÊNDICES

Tabela S 1. Dados de contingência para a frequências da flutuabilidade geral das drupas de *S. terebinthifolia* por *M. transvaalensis* em relação aos tratamentos protegida com agrotêxtil (P-TNT) e não Protegida (NP).

Parâmetro	P-TNT		NP	
	Contagem (#)	Proporção (%)	Contagem (#)	Proporção (%)
Flutua	4565	95,1	4714	98.2
Submerge	235	4.9	86	1.8
Total	4800	100.0	4800	100.0

Tabela S 2. Contagem e proporção dos sinais de parasitismo por *M. transvaalensis* em drupas de *S. terebinthifolia* em função dos tratamentos protegida (P-TNT) e não protegida (NP).

Parâmetro	Cicatriz		Orifício		Sem características		Total
	#	%	#	%	#	%	
NP	2216	46,2	1425	29,7	1159	24,1	4800
P-TNT	818	17,0	160	3,3	3822	79,6	4800
Total	3034		1585		4981		9600

Tabela S 3. Matriz cruzada entre a flutuabilidade das drupas de *S. terebinthifolia* e a ocorrência de parasitismo por *M. transvaalensis*.

Parâmetro	Parasita Ausente		Parasita Presente		Total
	N	%	N	%	
Flutua	7298	78,65	1981	21,34	9279
Submerge	266	82,86	55	17,13	321
Total	7564	-	2036	-	9600

Tabela S 4. Matriz cruzada entre a frequência absoluta flutuabilidade (N) e a respectiva proporção (%) e a ocorrência de parasitismo por *M. transvaalensis* em drupas de *S. terebinthifolia*.

Parâmetro	Ovos		Larvas		Pupas		Adulto		Total
	N	%	N	%	N	%	N	%	N
Flutua	180	9,08	416	20,99	414	20,89	971	49,02	1981
Submerge	2	3,63	23	41,81	7	12,72	23	41,81	55
Total	182	-	439	-	421	-	994	-	2036

Tabela S 5. Frequência absoluta (#) e proporção (%) dos estádios de vida do parasita *M. transvaalensis* em função dos tratamentos protegida (P-TNT) e não protegida (NP) em drupas de *S. terebinthifolia*.

Parâmetro	Ovo		Larv		Pupa		Adulto		Ausente		Total
			a								
	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%	n
NP	152	3,16	328	6,83	392	8,16	555	11,56	3373	70,27	4800
P-TNT	11	0,229	108	2,25	31	0,64	77	1,6	4573	95,27	4800
Total	182	-	439	-	421	-	994	-	7564	-	9600

Teste qui-quadrado de Pearson: = 1502,22; gl = 4; $p < 0,00$. Teste G: G = 1688,2; gl = 4; $p < 0,001$. V de Cramér: 0,396. Fonte: Dados da pesquisa, 2026.

Tabela S 6. Amostras *S. terebinthifolia* por repetição, tempo e tratamento. a) testes de flutuabilidade; b) Sanidade do epicarpio; c) Parasitismo e d) Sanidade do embrião.

Individuo	Repetição de 25 Dias	Tratamento	Total avaliadas	Testes	
1	1	30	1	25	a; b; c e d
1	2	30	1	50	a; b; c e d
1	3	30	1	75	a; b; c e d
1	1	30	2	50	a; b; c e d
1	2	30	2	100	a; b; c e d
1	3	30	2	150	a; b; c e d
16	3	30	2	2400	a; b; c e d
16	3	60	2	4800	a; b; c e d
16	3	90	2	7200	a; b; c e d
16	3	120	2	9600	a; b; c e d

Tabela S 7. Estatística descritiva da taxa de parasitismo (%) de *M. transvaalensis* em drupas de *S. terebinthifolia* para o tratamento (P-TNT) nos períodos de avaliação (DAT).

Parametro	P0.30-NP	P0.60-NP	P0.90-NP	P0.120-NP
Média	60,08333	47,33333	65,33333	67,41667
Erro padrão	4,457983	4,687256	5,181162	5,899113
Mediana	60,66667	46,66667	64	72
Modo	54,66667	54,66667	80	82,66667
Desvio padrão	17,83193	18,74902	20,72465	23,59645
Variância da amostra	317,9778	351,5259	429,5111	556,7926
Curtose	-0,66167	-0,10865	-1,49398	-1,27092
Assimetria	-0,43413	0,488384	-0,0756	-0,21298
Intervalo	58,66667	65,33333	61,33333	73,33333
Mínimo	26,66667	21,33333	34,66667	25,33333
Máximo	85,33333	86,66667	96	98,66667
Soma	961,3333	757,3333	1045,333	1078,667
Contagem	16	16	16	16
Nível de confiança (95,0%)	9,501966	9,99065	11,04339	12,57366

Tabela S 8. Estatística descritiva da taxa de parasitismo (%) de *M. transvaalensis* em drupas de *S. terebinthifolia* em função do controle (NP) nos períodos de avaliação (DAT).

Parametro	<i>P0.30-P-TNT</i>	<i>P0.60-P-TNT</i>	<i>P0.90-P-TNT</i>	<i>P0.120-P-TNT</i>
Média	14,83333	10,91667	1,833333	4,666667
Erro padrão	3,189973	3,031242	0,362604	1,115547
Mediana	12	6	1,333333	3,333333
Modo	18,66667	0	1,333333	2,666667
Desvio padrão	12,75989	12,12497	1,450415	4,462187
Variância da amostra	162,8148	147,0148	2,103704	19,91111
Curtose	-0,61428	0,509512	0,982013	1,573924
Assimetria	0,617283	1,260885	0,898931	1,365976
Intervalo	41,33333	38,66667	5,333333	16
Mínimo	0	0	0	0
Máximo	41,33333	38,66667	5,333333	16
Soma	237,3333	174,6667	29,33333	74,66667
Contagem	16	16	16	16
Nível de confiança (95,0%)	6,799266	6,460939	0,772872	2,377732

Tabela S 9. Matriz de Correlação de Spearman para conjunto de dados do tratamento protegido (P-TNT).

		Dias	Flutuabilidade	Características	Parasitismo	Saúde do Embrião
Correlation Matrix						
Dias	Spearman's rho	—				
	df	—				
	p-value	—				
	N	—				
Flutuabilidade	Spearman's rho	-0.182***	—			
	df	4798	—			
	p-value	<.001	—			
	N	4800	—			
Características	Spearman's rho	0.135***	0.009	—		
	df	4798	4798	—		
	p-value	<.001	0.547	—		
	N	4800	4800	—		
Parasitismo	Spearman's rho	-0.038**	0.019	-0.109***	—	
	df	4798	4798	4798	—	
	p-value	0.009	0.180	<.001	—	
	N	4800	4800	4800	—	
Saúde do Embrião	Spearman's rho	0.131***	0.023	0.584***	-0.168***	—
	df	4797	4797	4797	4797	—
	p-value	<.001	0.117	<.001	<.001	—
	N	4799	4799	4799	4799	—

Note. * p < .05, ** p < .01, *** p < .001

Tabela S 10. Matriz de Correlação de Spearman para conjunto de dados do tratamento não protegido (NP).

		Dias	Flutuabilidade	Características	Parasitismo	Saúde do Embrião
Correlation Matrix						
Dias	Spearman's rho	—				
	df	—				
	p-value	—				
	N	—				
Flutuabilidade	Spearman's rho	-0.039**	—			
	df	4798	—			
	p-value	0.006	—			
	N	4800	—			
Características	Spearman's rho	0.093***	-0.024	—		
	df	4798	4798	—		
	p-value	<.001	0.090	—		
	N	4800	4800	—		
Parasitismo	Spearman's rho	-0.070***	-0.006	-0.005	—	
	df	4798	4798	4798	—	
	p-value	<.001	0.657	0.740	—	
	N	4800	4800	4800	—	
Saúde do Embrião	Spearman's rho	0.008	0.019	0.410***	-0.060***	—
	df	4798	4798	4798	4798	—
	p-value	0.570	0.194	<.001	<.001	—
	N	4800	4800	4800	4800	—

Note. * p < .05, ** p < .01, *** p < .001

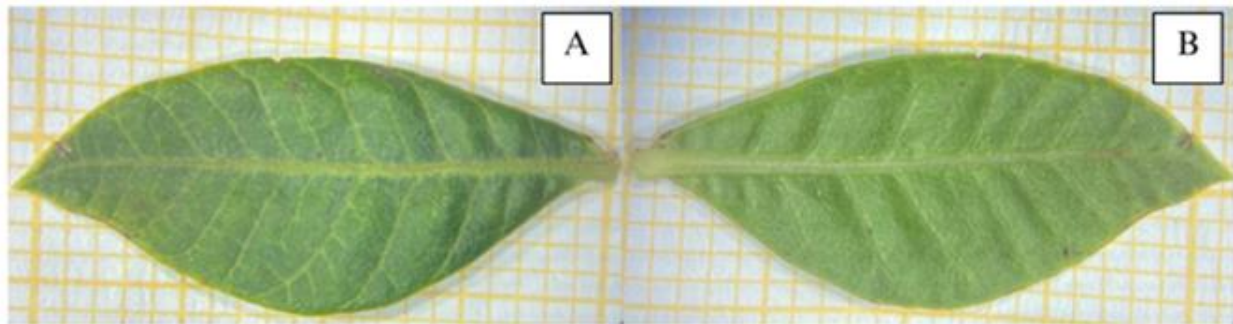
Tabela S 11. Critério de avaliação do ajuste dos modelos.

Métrica	Intervalo	Interpretação	Referência
R^2	Próximo de 1	o modelo explica a maior parte da variabilidade dos dados, indicando um bom ajuste.	Yun et al. 2024
	Próximo de 0	o modelo pouco explica a variabilidade dos dados, indicando um ajuste.	
REQM	Quanto menor, melhor	fornece uma visão intuitiva da magnitude do erro comparável aos dados reais.	Liang et al. 2025

Tabela S 12. Variáveis dendrometrias (Área da copa – Acopa; Diâmetro da altura do peito - DAP; Altura total – Ht e Peso absoluto - P).

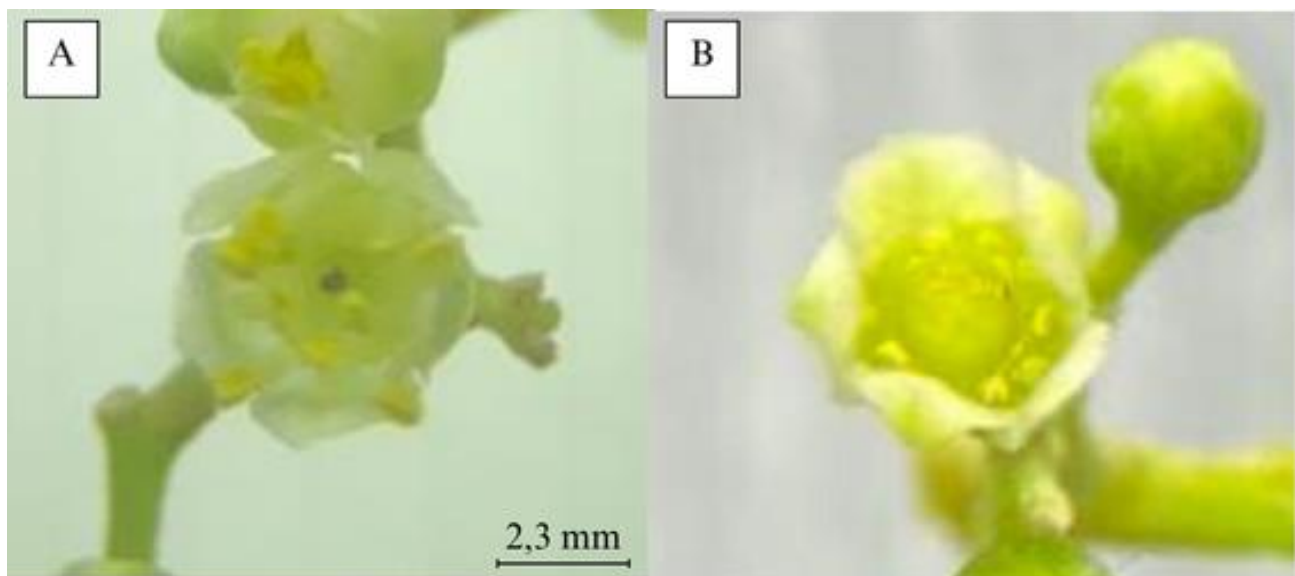
Cod.	Coordenadas		Fragmento	Teor de Umidade			DC	Dados Dendométricos			P(g)
				Mf (g)	Ms (g)	Tr (%)		Acopa (m²)	DAP (cm)	Ht (m)	
ARV - 1*	23°34'59.2"S	47°31'30.6"W	CCTS	1,128	1,0095	10,50	24/04/2023	20.87	12	3.02	2780.3
ARV - 2*	23°34'58.0"S	47°31'31.3"W	CCTS	1,122	0,995	11,32	29/04/2023	12.92	9.35	8.75	2599.4
ARV - 3	23°34'59.1"S	47°31'30.8"W	CCTS	1,205	1,053	12,61	08/05/2023	8.64	6.01	3.62	2049.1
ARV - 4*	23°34'56.2"S	47°31'39.1"W	ROXO	1,135	1,006	11,35	16/05/2023	7.04	7.69	5.94	579.5
ARV - 5*	23°35'09.7"S	47°31'09.5"W	VIVEIRO	1,1385	1,0035	11,83	21/05/2023	8.93	5.09	3.65	339.8
ARV - 6	23°35'10.2"S	47°31'05.2"W	VIVEIRO	1,144	1,01	11,72	21/05/2023	2.37	9.87	9.75	179.5
ARV - 7*	23°35'09.7"S	47°31'09.3"W	VIVEIRO	1,1815	1,052	10,96	21/05/2023	6.18	4.69	2.2	359.7
ARV - 8	23°35'10.4"S	47°31'05.0"W	VIVEIRO	1,1895	1,0505	11,69	28/05/2023	11.73	6.39	4	219.7
ARV - 9	23°35'09.9"S	47°31'05.0"W	VIVEIRO	1,124	0,994	11,57	28/05/2023	5.4	5	2.7	200
ARV - 10	23°35'09.5"S	47°31'04.7"W	VIVEIRO	1,127	1	11,27	10/05/2024	11.97	6.04	3.65	122.4
ARV - 11	23°35'09.5"S	47°31'05.1"W	VIVEIRO	1,094	0,968	11,51	10/05/2024	3.77	4.45	2	215.2
ARV - 12	23°58'59.9"S	47°51'77.6"W	VIVEIRO	1,169	1,03	11,91	13/05/2024	22.42	7.8	6.15	381
ARV - 13	23°35'09.4"S	47°31'04.1"W	VIVEIRO	1,1215	0,9925	11,50	13/05/2024	13.73	7.9	6.25	741.2
ARV - 14	23°35'10.3"S	47°31'05.6"W	VIVEIRO	1,078	0,9555	11,38	15/05/2024	7.44	7.21	5.2	150.9
ARV - 15*	23°35'08.8"S	47°31'03.7"W	VIVEIRO	1,1335	1,007	11,15	22/05/2024	1.98	9.54	9.1	1644.9
ARV - 17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	NA
ARV - 18*	23°35'10.7"S	47°31'07.0"W	VIVEIRO	1,027	0,911	11,30	22/05/2024	2.6-3	5.41	2	717.5
ARV - 19	23°35'08.4"S	47°31'01.9"W	VIVEIRO	1,084	0,972	10,33	29/05/2024	20.04	8.43	7.05	334.8
ARV - 20	23°35'08.8"S	47°31'01.2"W	VIVEIRO	1,1375	1,007	11,48	29/05/2024	21.22	7.72	5.3	391.5
ARV - 21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	NA
ARV - 22	23°35'08.7"S	47°31'01.6"W	VIVEIRO	1,101	0,968	12,08	29/05/2024	17.99	8	4.9	445.7
ARV - 23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	NA
ARV - 24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	NA
ARV - 25	23°34'54.4"S	47°31'40.9"W	VIVEIRO	1,1015	0,9735	11,62	05/06/2024	14.42	5.73	4.12	239.7
ARV - 26*	23°35'10.4"S	47°31'06.8"W	VIVEIRO	1,1615	1,035	10,89	30/05/2024	8.2	3.79	2.3	1370.9
ARV - 27*	23°35'12.2"S	47°31'08.3"W	VIVEIRO	1,0715	0,945	11,79	30/05/2024	4.04	2.06	1.9	427.6
ARV - 28*	23°35'12.4"S	47°31'08.4"W	VIVEIRO	-	-	-	30/05/2024	1.11	4.1	2.5	1591.6
ARV - 29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	NA
ARV - 30*	23°58'66.3"S	47°51'96.4"W	VIVEIRO	1,094	0,976	10,80	01/06/2024	2.61	6.1	5.9	1318.1
ARV - 31*	23°34'57.1"S	47°31'20.1"W	VIVEIRO	1,158	1,0255	11,46	01/06/2024	3.51	7.38	5.45	359.1
ARV - 32*	23°34'50.0"S	47°31'21.7"W	VIVEIRO	1,1585	1,026	11,43	03/06/2024	11.12	5.72	3.15	619.3
ARV - 33*	23°58'05.6"S	47°52'27.2"W	ADN	1,0975	0,966	11,95	04/06/2024	8.5	5.74	3.2	940.3
ARV - 34*	23°58'65.3"S	47°51'89.0"W	ADN	1,1275	1,012	10,24	04/06/2024	8.76	10.1	4.9	545.2
ARV - 35*	23°58'62.3"S	47°51'89.0"W	VIVEIRO	1,149	1,0175	11,44	05/06/2024	11.37	3.25	2.99	317.2

Figura S 1. Folha de *S. terebinthifolia*. A - Face adaxial. B - Face adaxial.



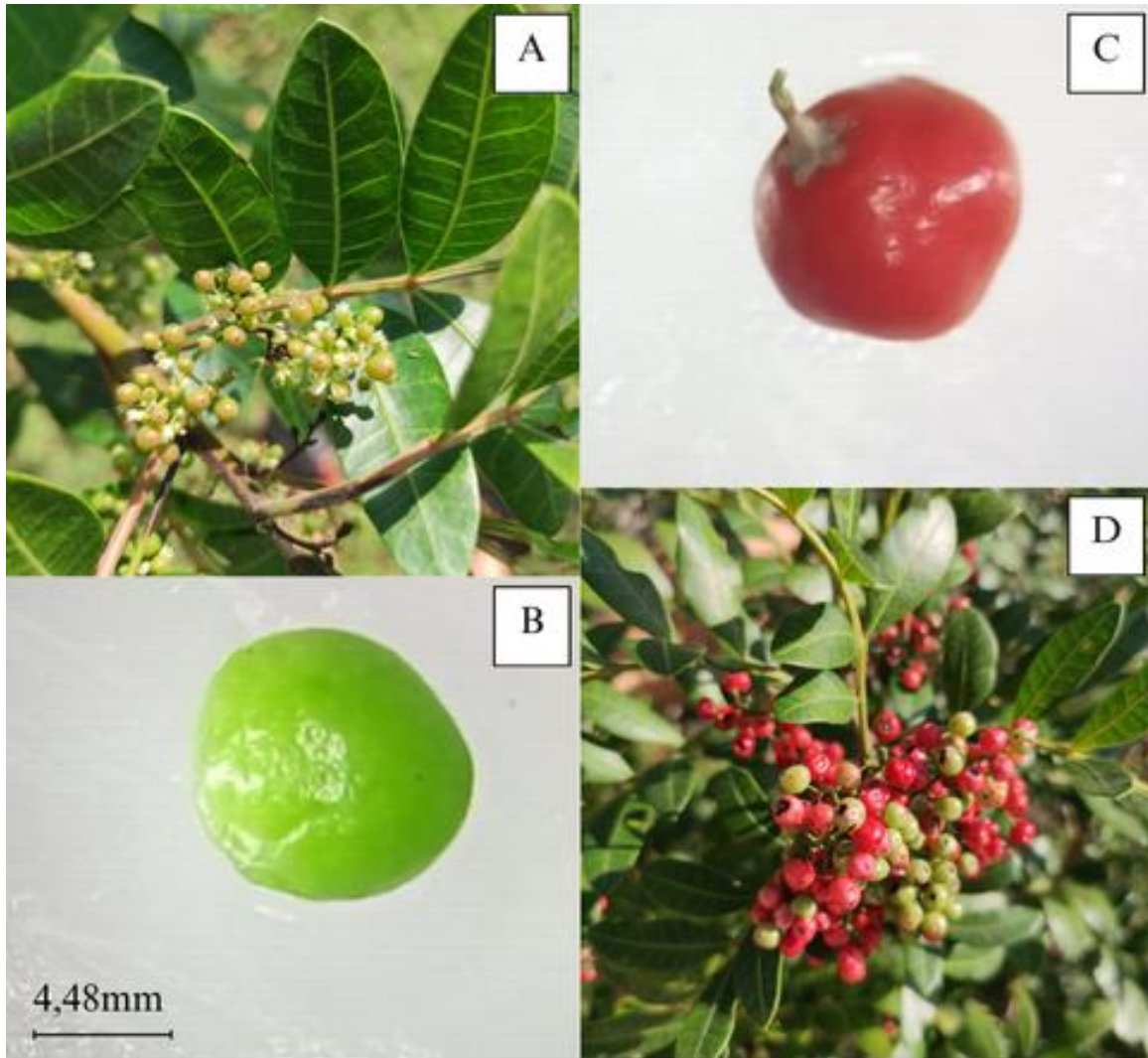
Créditos da figura: Sandra Massamba, 2026.

Figura S 2. Morfologia floral de *S. terebinthifolia*. A: Flor de *S. terebinthifolia*. Flor masculina (estaminada) na visão frontal. B: Flor feminina (pistilada) na visão fronta.



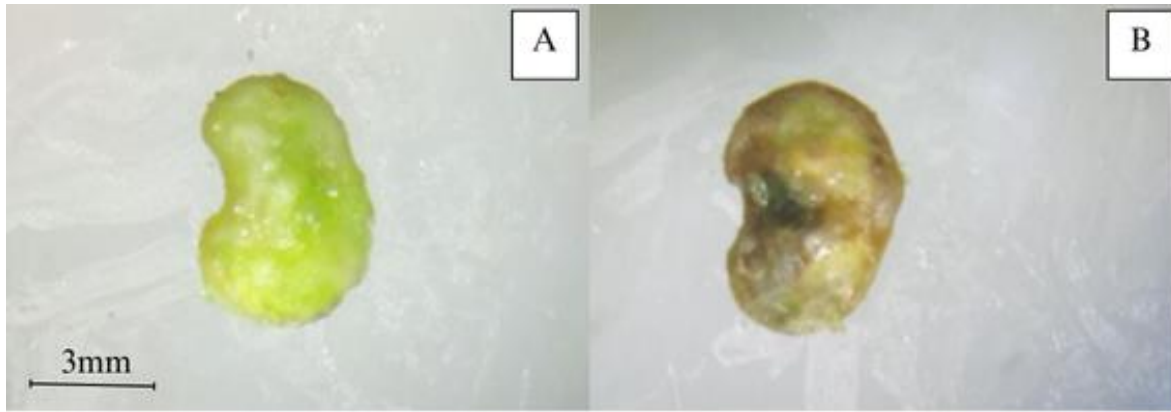
Créditos da figura: Sandra Massamba, 2026.

Figura S 3. Variação no desenvolvimento das drupas de *S. terebinthifolia* dentro da mesma infrutescência. A: Infrutescência em estágio imaturo. B: Drupas imatura (verde). C: Drupa amadurecida. D: Infrutescência em estágio amadurecidas.



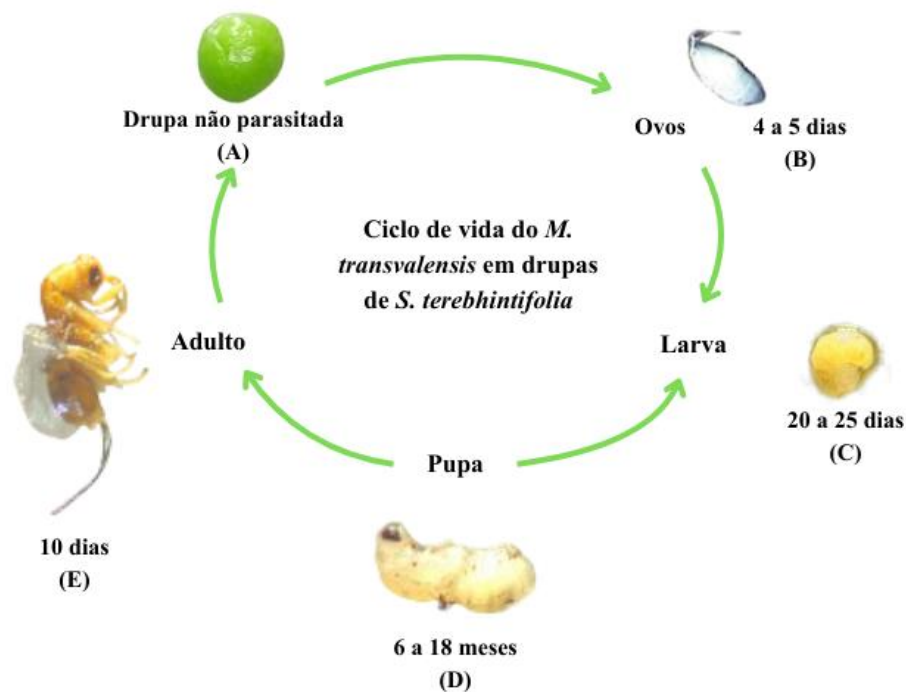
Crédito da figura: Sandra Massamba, 2026.

Figura S 4. Aspecto morfológico de sementes de *S. terebinthifolia* em diferentes estádios de maturação. A: Sementes extraída de drupa imatura (verde). B: Semente extraída de drupa madura.



Crédito da figura: Sandra Massamba, 2026.

Figura S 5. Ciclo de vida biológico de *M. transvaalensis* (Hymenoptera: Torymidae) em drupa de *Schinus terebinthifolia*.



Créditos da figura: Adaptado de Hussey 1956 (Hymenoptera: Torymidae) em *S. terebinthifolia*. 7A - Drupa parasitada pela fêmea da *M. transvaalensis* (Jansen González et al. 2020). 7B - Óvulo (Jansen González et al. 2020); 7C - Estágio larval do indivíduo na semente. 7D - Estágio pupal em desenvolvimento. 7E - Adulto da *M. transvaalensis*.