

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA

Victoria Karoline da Silva Pereira Barata

**REVISÃO SOBRE BIOTRANSFORMAÇÃO DE TERPENOIDES, FENÓIS E
ALCALOIDES POR LEPIDOPTERA**

Buri

2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

CENTRO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA

Victoria Karoline da Silva Pereira Barata

Revisão sobre biotransformação de terpenoides, fenóis e alcaloides
por Lepidoptera

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como exigência parcial para a obtenção do grau
de Bacharel em Ciências Biológicas na
Universidade Federal de São Carlos

Orientação: Prof^ª Dr^ª Débora Cristina Rother

Coorientação: Prof^º Dr^º Massuo Jorge Kato

Buri

2025

Barata, Victoria Karoline da Silva Pereira

Revisão sobre biotransformação de terpenoides, fenóis e
alcaloides / Victoria Karoline da Silva Pereira Barata --
2025.
19f.

TCC (Graduação) - Universidade Federal de São Carlos,
campus Lagoa do Sino, Buri

Orientador (a): Debora Cristina Rother

Banca Examinadora: Andre Victor Lucci Freitas, Lydia
Fumiko Yamaguchi, Debora Cristina Rother

Bibliografia

1. Biotransformação, Lepidoptera, Metabólitos
secundários. I. Barata, Victoria Karoline da Silva Pereira.
II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática
(SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Lissandra Pinhatelli de Britto - CRB/8 7539



**FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
COORDENAÇÃO DO CURSO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS (CCCBIO-LS)**

Rod. Lauri Simões de Barros km 12 - SP-189, s/n - Bairro Aracaçu, Buri/SP, CEP 18290-000
Telefone: (15) 32569030 - <http://www.ufscar.br>

DP-TCC-FA nº 54/2025/CCCBio-LS/CCN/R

Graduação: Defesa Pública de Trabalho de Conclusão de Curso

Folha Aprovação (GDP-TCC-FA)

FOLHA DE APROVAÇÃO

VICTORIA KAROLINE DA SILVA PEREIRA BARATA

**REVISÃO SOBRE BIOTRANSFORMAÇÃO DE TERPENÓIDES, FENÓIS E ALCALÓIDES POR
LEPIDOPTERA**

Trabalho de Conclusão de Curso

Universidade Federal de São Carlos – Campus Lagoa do Sino

Buri, 10 de dezembro de 2025

ASSINATURAS E CIÊNCIAS

Cargo/Função	Nome Completo
Orientadora	Débora Cristina Rother
Membro da Banca 1	André Victor Lucci Freitas
Membro da Banca 2	Lydia Fumiko Yamaguchi



Documento assinado eletronicamente por **Debora Cristina Rother, Docente**, em 17/12/2025, às 22:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufscar.br/autenticacao>, informando o código verificador **2116070** e o código CRC **51E48FA7**.

Referência: Caso responda a este documento, indicar expressamente o Processo nº 23112.036918/2025-91

SEI nº 2116070

Modelo de Documento: Grad: Defesa TCC: Folha Aprovação, versão de 02/Agosto/2019



A autenticidade do documento pode ser conferida no site:
sigad.unicamp.br/verifica, informando o código verificador:
53C0B61D AD6D420A A38BE202 DE1AFF1F



Documento assinado digitalmente

LYDIA FUMIKO YAMAGUCHI

Data: 18/12/2025 16:28:00-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

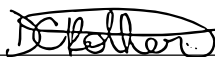
FOLHA DE APROVAÇÃO

VICTORIA KAROLINE DA SILVA PEREIRA BARATA

REVISÃO SOBRE BIOTRANSFORMAÇÃO DE TERPENÓIDES, FENÓIS E
ALCALÓIDES POR LEPIDOPTERA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como exigência parcial para a obtenção do grau
de Bacharel em Ciências Biológicas na
Universidade Federal de São Carlos. Buri, 15 de
dezembro de 2025

Orientador(a)



Profª Drª Débora Cristina Rother (UFSCar/LS)

Examinador 1



Profº Drº André Victor Lucci Freitas (UNICAMP)

Examinador 2



Drª Lydia Fumiko Yamaguchi (IPT)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço ao Lucifer, meu gato e parceiro de vida. Agradeço também, a todos os profissionais de saúde mental que me acompanharam durante toda a graduação, em especial, meu psicólogo Lucas Fukue, por me acompanhar e iluminar meus pensamentos sombrios.

Agradeço aos meus amigos Max e Hugo por todo suporte emocional, por serem sempre tão solícitos e parceiros. A Naira, minha melhor amiga desde o primeiro dia em que nos conhecemos, na matrícula da universidade.

A todo o corpo docente de Ciências Biológicas da UFSCar Lagoa do Sino, sem dúvidas, o melhor curso que eu poderia ter escolhido. Em especial a Débora Rother, minha orientadora neste trabalho, pela paciência e auxílio.

Ao Laboratório de Química de Produtos Naturais do Instituto de Química da USP e a todos seus membros, pela ajuda e acolhimento, em especial ao meu co-orientador Massuo Jorge Kato, pela parceria e colaboração.

Ao Labbor, Laboratório de Ecologia e Sistemática de Borboletas da UNICAMP, por todo conhecimento compartilhado, em especial ao André Victor Freitas (Baku), pelo acolhimento e por abrir tantas portas no meu caminho.

Aos meus pais, irmãos e avós, por me proporcionarem a oportunidade de ingressar e concluir o ensino superior.

Por último, mas não menos importante, dedico este trabalho de conclusão de curso ao biólogo e divulgador científico Pirula, que há mais de uma década me inspira através da biologia e da ciência.

*“Nothing in biology makes senses
except in the light of evolution”*

- (Theodosius H. Dobzhansky)

RESUMO

BARATA, Victoria Karoline da Silva Pereira. **Biotransformação de terpenoides, fenóis e alcaloides por Lepidoptera**. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de São Carlos, *campus* Lagoa do Sino, Buri, 2025.

Palavras-chave: Lepidoptera; metabólitos secundários; biotransformação.

A presença de compostos secundários em angiospermas desempenha um papel importante contra a herbivoria por insetos. No entanto, alguns lepidópteros desenvolveram estratégias de resistência para lidar com seus efeitos nocivos. A metabolização de compostos secundários de plantas por lagartas de lepidoptera incluindo o sequestro e biotransformação desses compostos ainda são pouco compreendidos. Este levantamento bibliográfico reúne e evidencia as relações entre as famílias de Lepidoptera e angiospermas, e a utilização das principais classes de metabólitos secundários: terpenoides, fenóis e alcaloides. Os termos “biotransformation” e “Lepidoptera” foram utilizados nos bancos de dados Scopus e Google Scholar. A seleção de artigos considerou apenas aqueles que abordam a biotransformação em espécies de lepidópteros “não-generalistas”. Foram encontrados vinte e quatro estudos sobre biotransformação de metabólitos secundários envolvendo nove famílias de Lepidoptera e onze famílias de angiospermas. Dentre eles, quatro versam sobre terpenoides, sete sobre fenóis e quinze sobre alcaloides. O registro de poucas interações encontradas demonstra a baixa quantidade de estudos sobre os mecanismos de detoxificação e sequestro de metabólitos secundários e sustenta a evolução das interações entre lepidópteros e angiospermas. Mais estudos são necessários para demonstrar a importância ecológica e evolutiva desses compostos, e as vias metabólicas envolvidas nessas interações.

ABSTRACT

BARATA, Victoria Karoline da Silva Pereira. **Biotransformation of terpenoids, phenols, and alkaloids by Lepidoptera**. 2025. Undergraduate Thesis - Federal University of São Carlos, Lagoa do Sino campus, Buri, 2025.

Keywords: Lepidoptera; secondary metabolites; biotransformation.

The occurrence of secondary compounds in angiosperms plays an important role against insect herbivory. However, some lepidopterans have developed resistance strategies to cope with their harmful effects. The biosynthetic pathways that describe the sequestration and biotransformation of these compounds are still poorly understood. This literature survey highlights the relationship between Lepidoptera and angiosperm families, and the involvement of the main classes of secondary metabolites: terpenoids, phenols, and alkaloids. The terms “biotransformation” and “Lepidoptera” were searched in the Scopus and Google Scholar databases. Only articles that examined biotransformation in non-generalist lepidopteran species were selected. Twenty-four studies were found on the biotransformation of secondary metabolites involving nine Lepidoptera families and eleven angiosperm families. Among them, four deal with terpenoids, seven with phenols, and fifteen with alkaloids. The small set of identified interactions underscores a notable gap in research concerning the mechanisms by which secondary metabolites are detoxified and sequestered, reinforcing the idea that these processes have shaped evolutionary relationships between lepidopterans and angiosperms. Further investigations are essential to elucidate the ecological and evolutionary importance of these compounds and the metabolic routes that mediate these interactions.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Famílias de Lepidoptera que biotransformam compostos secundários encontrados em angiospermas.....	12
Tabela 2 - Classificação dos metabólitos secundários encontrados em angiospermas e biotransformados por Lepidoptera	13

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1. INTERAÇÕES PLANTA-INSETO, HERBIVORIA E ALELOQUÍMICOS	10
1.2. JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS	11
2 MATERIAIS E MÉTODOS	11
3 RESULTADOS	12
4 DISCUSSÃO	14
5 CONCLUSÃO	15
REFERÊNCIAS	15

1 INTRODUÇÃO

1.1. INTERAÇÕES PLANTA-INSETO, HERBIVORIA E ALELOQUÍMICOS

As pressões seletivas resultantes das interações entre insetos herbívoros e angiospermas são consideradas um dos principais fatores que sustentam a diversificação e coevolução de ambos os grupos (SUCHAN; ÁLVAREZ, 2015). Através da ingestão de plantas, além de compostos fundamentais para manutenção de suas funções vitais, como carboidratos, proteínas, lipídios e ácidos nucleicos, os insetos herbívoros também consomem compostos que desempenham diferentes funções ecológicas nas plantas: os metabólitos secundários (JECKEL *et al.*, 2022).

Estes são chamados de aleloquímicos, compostos que atuam na comunicação interespecífica e possuem propriedades que podem atrair ou repelir insetos (FRAENKEL, 1959). No entanto, alguns lepidópteros não apenas sequestram esses compostos, mas também metabolizam (RAMOS *et al.*, 2012).

Em insetos, a defesa química é caracterizada pela presença de uma ou mais substâncias químicas que facilitam a aproximação ou o afastamento de predadores, ou seja, a atuação de uma ou mais substâncias contra a predação de um indivíduo (TRIGO, 2000). Nem sempre as respostas dos predadores estão relacionadas à presença de compostos químicos nocivos (TRIGO, 2000). No entanto, alguns grupos de Lepidoptera possuem uma relação bastante dependente de compostos químicos adquiridos de angiospermas para defesa e reprodução (TRIGO, 2000).

As três principais classes de metabólitos secundários encontradas no reino vegetal são: terpenoides, fenóis e alcaloides (PALAZON; ALCALDE, 2025). Os insetos herbívoros desenvolveram uma gama de estratégias para resistir aos efeitos nocivos causados pelos compostos secundários presentes nas plantas (PENTZOLD *et al.*, 2014; HECKEL, 2018). Essas estratégias podem ser divididas em duas grandes categorias: 1) tolerância e 2) resistência (JECKEL *et al.*, 2022).

As estratégias de tolerância atuam inibindo os danos causados pelos metabólitos secundários sem qualquer modificação em suas estruturas ou transporte dessas moléculas (JECKEL *et al.*, 2022). Seus mecanismos incluem a inibição de enzimas de ativação desses

compostos, insensibilidade, alterando o sítio de ligação do alvo, exclusão e compensação super expressando os alvos dos metabólitos secundários (JECKEL *et al.*, 2022).

Já as estratégias de resistência atuam na redução da toxicidade, desvio ou eliminação rápida das moléculas através do transporte ativo e/ou biotransformação desses compostos (JECKEL *et al.*, 2022). Seus mecanismos correspondem aos processos de metabolização, sequestro e excreção de metabólitos secundários, o que implica na conversão dos metabólitos secundários em outros compostos, em geral, menos reativos (JECKEL *et al.*, 2022).

Os mecanismos envolvidos podem ser classificados em reações de Fase I, Fase II e Fase III (MEYER, 1996). A Fase I envolve a oxidação, redução ou hidrólise dos metabólitos secundários através da atuação de enzimas da família dos citocromos P450 (NAUEN *et al.*, 2022). A Fase II corresponde à metilação, glicosilação, acetilação, sulfatação ou conjugação com aminoácidos ou glutatona através da atuação das enzimas chamadas de glutatona-S-transferases (KETTERMAN; SAISAWANG; WONGSANTICHON, 2011). A Fase III, por sua vez, comporta o transporte do metabólito catalisado por enzimas transportadoras (WU *et al.*, 2019; HILLIOU *et al.*, 2021).

1.2. JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS

Apesar de seus mecanismos bioquímicos e funções ecológicas serem reconhecidos, as vias biossintéticas que descrevem o sequestro e biotransformação de metabólitos secundários por insetos herbívoros ainda são pouco compreendidos (JECKEL *et al.*, 2022).

Através do levantamento de estudos sobre a biotransformação das principais classes de metabólitos secundários por lepidópteros a partir da ingestão de angiospermas, o presente trabalho reúne e evidencia as relações entre as famílias de Lepidoptera e angiospermas, e a utilização de compostos terpenoides, fenóis e alcaloides.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A revisão foi conduzida a partir da busca dos termos “biotransformation” e “Lepidoptera” nos bancos de dados Scopus e Google Scholar. Foram considerados apenas os trabalhos que se referem a espécies de Lepidoptera “não-generalistas”, ou seja, evidências relacionadas a estratégias de resistência às moléculas pertencentes às principais classes de metabólitos secundários presentes em suas plantas hospedeiras. As espécies de angiospermas

e Lepidoptera são apresentadas tendo em vista a categoria hierárquica de família como nível taxonômico representativo.

3 RESULTADOS

Os artigos selecionados abordam interações entre nove famílias de Lepidoptera e onze famílias de angiospermas (Tabela 1).

TABELA 1 - Famílias de Lepidoptera que biotransformam compostos secundários encontrados em angiospermas.

LEPIDOPTERA	ANGIOSPERMAS
Erebidae	Asteraceae
	Boraginaceae
	Fabaceae
	Orchidaceae
Geometridae	Betulaceae
Hesperiidae	Piperaceae
Lycaenidae	Fabaceae
Nymphalidae	Apocynaceae
	Asteraceae
	Boraginaceae
Papilionidae	Aristolochiaceae
	Piperaceae
Pieridae	Brassicaceae
Pyralidae	Berberidaceae
Saturniidae	Anacardiaceae

Fonte: Autoria própria (2025).

Dos vinte e quatro estudos sobre biotransformação de compostos secundários escolhidos, quatro versam sobre terpenoides, sete sobre fenóis e quinze sobre alcaloides (Tabela 2).

TABELA 2 - Classificação dos metabólitos secundários encontrados em angiospermas e biotransformados por Lepidoptera.

CLASSES DE METABÓLITOS	PLANTA - INSETO	REFERÊNCIAS
(I) Terpenóides	Anacardiaceae - Saturniidae	(LOPES <i>et al.</i> , 2020)
	Aristolochiaceae - Papilionidae	(SCHNEIDEWIND <i>et al.</i> , 2024)
	Asteraceae - Nymphalidae	(WAHLBERG, 2007)
	Piperaceae - Papilionidae	(RAMOS <i>et al.</i> , 2012)
(II) Fenóis	Aristolochiaceae - Papilionidae	(PRIESTAP <i>et al.</i> , 2012; SCHNEIDEWIND <i>et al.</i> , 2024)
	Betulaceae - Geometridae	(LAHTINEN; KAPARI; KENTTÄ, 2006)
	Brassicaceae - Pieridae	(PEREIRA <i>et al.</i> , 2009)
	Piperaceae - Papilionidae/ Hesperidae	(RAMOS; BARBOSA; VANIN, 2014; RAMOS <i>et al.</i> , 2008; RAMOS <i>et al.</i> , 2022)
	Fabaceae - Lycaenidae	(GEUDER <i>et al.</i> , 1997)
(III) Alcalóides	Aristolochiaceae - Papilionidae	(SCHNEIDEWIND <i>et al.</i> , 2024)
	Asteraceae - Erebidae	(EHMKE <i>et al.</i> , 1990; VON NICKISCH-ROSENEGK; WINK, 1993; HARTMANN <i>et al.</i> , 2004; HARTMANN <i>et al.</i> , 2005)
	Apocynaceae - Erebidae/	(HARTMANN <i>et al.</i> , 2005; TRIGO <i>et al.</i> , 1996; EDGAR, 1982)

	Nymphalidae	
	Berberidaceae - Pyralidae	(VENTHUR <i>et al.</i> , 2022)
	Boraginaceae - Erebidae/ Nymphalidae	(MARTINS; TRIGO, 2016; HARTMANN <i>et al.</i> , 2005)
	Fabaceae - Erebidae	(HARTMANN <i>et al.</i> , 2004; HARTMANN <i>et al.</i> , 2005; FERRO <i>et al.</i> , 2006)
	Orchidaceae - Erebidae	(HARTMANN <i>et al.</i> , 2005)

Fonte: Autoria própria (2025).

4 DISCUSSÃO

Diante das cerca de 416 famílias de angiospermas descritas (COLE *et al.*, 2019), apenas 11 famílias foram identificadas. Em relação aos lepidópteros, 9 famílias de Lepidoptera foram encontradas dentre as 126 descritas (KHAN *et al.*, 2022) (Tabela 1).

O registro de poucas interações encontradas reflete, em parte, não apenas a baixa quantidade de estudos sobre os mecanismos de detoxificação e sequestro das principais classes de metabólitos secundários. Ainda assim, constata-se que as interações entre lepidópteros e angiospermas são altamente específicas (Tabela 1). Apesar de possuírem mecanismos para biotransformar apenas compostos alcalóides, espécies da família Erebidae possuem interações com quatro famílias de angiospermas (Tabela 1). A importância ecológica desses metabólitos tanto para as plantas, quanto para as Lepidoptera, evidenciam a coevolução desses grupos (HECKEL, 2018).

Os resultados mostram que os papilionídeos são os únicos que possuem mecanismos para biotransformar terpenoides, fenóis e alcaloides consumidos de espécies de Asteraceae e Piperaceae (Tabela 2). Outro grupo que metaboliza mais de uma classe de compostos secundários é Nymphalidae, detoxificando e/ou sequestrando terpenoides de asteráceas e alcaloides de Apocynaceae e Boraginaceae (Tabela 2). Com exceção destes, os dados sugerem que as famílias de Lepidoptera possuem mecanismos de resistência para lidar com apenas uma classe de metabólitos (Tabela 2).

Embora o termo desintoxicação seja comumente empregado para se referir à metabolização de compostos secundários em insetos herbívoros, ele implica que o produto da

metabolização é menos tóxico para o herbívoro do que o produto intacto, o que nem sempre é testado (JECKEL *et al.*, 2022).

Apesar de trabalhos recentes destacarem o papel da microbiota intestinal para a biotransformação de metabólitos secundários em insetos, a microbiota intestinal dos lepidópteros não parece ter contribuições significativas neste processo (ZHANG *et al.*, 2024).

Ademais, análises metabolômicas também podem ser utilizadas na identificação e determinação do destino dos metabólitos secundários à medida que são consumidos, armazenados ou excretados pelos lepidópteros, fornecendo informações sobre o uso e a eficiência dos processos de biotransformação e de vias metabólicas específicas (JANSEN *et al.*, 2009; JECKEL *et al.*, 2022).

5 CONCLUSÃO

Frente a diversidade de angiospermas e Lepidoptera, é evidente a falta de estudos sobre herbivoria e processos mediados por compostos químicos entre esses organismos, bem como a carência de identificação de compostos e vias metabólicas envolvidas. Mais esforços são necessários para elucidar ainda mais o significado ecológico e evolutivo da resistência dos lepidópteros aos metabólitos secundários encontrados em angiospermas.

REFERÊNCIAS

- COLE, T. C. H.; HILGER, H. H.; STEVENS, P. F.; CARVALHO, F. A. Filogenia das Angiospermas – Sistemática das Plantas com Flores. **Angiosperm Phylogeny Poster** (APP), jun. 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/312191626_Filogenia_das_Angiospermas_-_Sistem%C3%A1tica_das_Plantas_com_Flores_Portuguese_version_of_COLE_HILGER_STEVENS_2019_Angiosperm_Phylogeny_Poster_-_Flowering_Plant_Systematics. Acesso em: 13 nov. 2025.
- EDGAR, J. A. Pyrrolizidine alkaloids sequestered by Solomon Island Danaine butterflies: the feeding preferences of the Danainae and Ithomiinae. **Journal of Zoology**, v. 196, p. 385-399, jun. 1982. Disponível em: <https://zslpublications.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1469-7998.1982.tb03510.x>. Acesso em: 10 nov. 2025.
- EDGAR, J. A.; CULVENOR, C. C. J. Pyrrolizidine ester alkaloid in danaid butterflies. **Nature**, v. 248, p. 614-616, abr. 1974. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/248614a0>. Acesso em: 10 nov. 2025.
- EHMKE, A.; WITTE, L.; BILLER, A.; HARTMANN, T. Sequestration, N-Oxidation and Transformation of Plant Pyrrolizidine Alkaloids by the Arctiid Moth *Tyria jacobaeae* L. **Zeitschrift für Naturforschung C**, v. 45, n. 11-12, p. 1185-1192, jun. 1990. Disponível em:

<https://www.degruyterbrill.com/document/doi/10.1515/znc-1990-11-1217/html>. Acesso em: 19 nov. 2025.

EHRlich, P. R.; RAVEN, P. H. Butterflies and plants: a study in coevolution. **Evolution**, v. 18, n. 4, p. 586–608, dez. 1964. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1558-5646.1964.tb01674.x>. Acesso em: 16 de out. 2025.

FERRO, V. G.; GUIMARÃES, P. R.; TRIGO, J. R.; GUIMARÃES JR., P. S. de M. Why do larvae of *Utetheisa ornatrix* penetrate and feed in pods of *Crotalaria* species? Larval performance vs. chemical and physical constraints. **Entomologia Experimentalis et Applicata**, v. 121, n. 1, p. 23–29, mai. 2006. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1570-8703.2006.00450.x>. Acesso em: 19 nov. 2025.

FRAENKEL, G. S. The raison d'être of secondary plant substances. **Science**, v. 129, n. 3361, p. 1466–1470, mai. 1959. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.129.3361.1466>. Acesso em: 16 de out. 2025.

GEUDER, M.; WRAY, V.; FIEDLER, K.; PROKSCH, P. Sequestration and metabolism of host-plant flavonoids by the lycaenid butterfly *Polyommatus bellargus*. **Journal of Chemical Ecology**, v. 23, n. 5, p. 1361–1372, mai. 1997. Disponível em: <https://doi.org/10.1023/B:JOEC.0000006469.00557.69>. Acesso em: 18 nov. 2025.

HARTMANN, T.; THEURING, C.; BEUERLE, T.; ERNST, L.; SINGER, M. S.; BERNAYS, E. A. Acquired and partially de novo synthesized pyrrolizidine alkaloids in two polyphagous arctiids and the alkaloid profiles of their larval food-plants. **Journal of Chemical Ecology**, v. 30, n. 2, p. 229–254, fev. 2004. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15112722/>. Acesso em: 8 nov. 2025.

HARTMANN, T.; THEURING, C.; BEUERLE, T.; KLEWER, N.; SCHULZ, S.; SINGER, M. S.; BERNAYS, E. A. Reconhecimento específico, desintoxicação e metabolismo de alcaloides pirrolizidínicos por *Estigmene acrea* (Lepidoptera: Arctiidae). **Insect Biochemistry and Molecular Biology**, v. 35, n. 5, p. 391–411, dez. 2005. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15804574/>. Acesso em: 8 nov. 2025.

HECKEL, D. G. Insect detoxification and sequestration strategies. In: **Annual Plant Reviews: Insect-Plant Interactions**, editado por Claudia Voelckel; Georg Jander, v. 47, p. 77–114, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/9781118829783.ch3>. Acesso em: 18 nov. 2025.

HECKEL, D. G. Insect detoxification and sequestration strategies. **Annual Plant Reviews** online, p. 77–114, abr. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/9781119312994.apr0507>. Acesso em: 19 nov. 2025.

HILLIOU, F.; CHERTEMPS, T.; MAÏBÈCHE, M.; LE GOFF, G. Resistance in the Genus *Spodoptera*: Key Insect Detoxification Genes. **Insects**, v. 12, n. 6, p. 544, jun. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/insects12060544>. Acesso em: 28 nov. 2025.

JANSEN, J. J.; ALLWOOD, J. W.; MARSDEN-EDWARDS, E.; VAN DER PUTTEN, W. H.; GOODACRE, R.; VAN DAM, N. M. Metabolomic analysis of the interaction between

plants and herbivores. **Metabolomics**, v. 5, p. 150–161, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11306-008-0124-4>. Acesso em: 23 nov. 2025.

JECKEL, A. M.; BERAN, F.; ZÜST, T.; YOUNKIN, G.; PETSCHENKA, G.; POKHAREL, P.; DREISBACH, D.; GANAL-VONARBURG, S. C.; ROBERT, C. A. M. Metabolization and sequestration of plant specialized metabolites in insect herbivores: current and emerging approaches. **Frontiers in Physiology**, 13, 1001032, set. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fphys.2022.1001032>. Acesso em: 9 de out. 2025.

KHAN, A. U.; POLY, N. Y.; DUTTA, S.; ALAM, F. Lepidopteran insects status and diversity: a review. **Journal of Multidisciplinary Applied Natural Science**, v. 3, n. 1, p. 55–80, jan. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.47352/jmans.2774-3047.140>. Acesso em: 13 nov. 2025.

KETTERMAN, A. J.; SAISAWANG, C.; WONGSANTICHON, J. Insect glutathione transferases: an overview of the current knowledge. **Drug Metabolism Reviews**, v. 43, n. 2, p. 253–265, mai. 2011. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/10.3109/03602532.2011.552911>. Acesso em: 28 nov. 2025.

LAHTINEN, M.; KAPARI, L.; KENTTÄ, J. Newly hatched neonate larvae can glycosylate: the fate of *Betula pubescens* bud flavonoids in first instar *Epirrita autumnata*. **Journal of Chemical Ecology**, v. 32, n. 3, p. 537–546, mar. 2006. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10886-005-9015-6>. Acesso em: 9 nov. 2025.

LOPES, P. H. R.; DO VALE, J. P. C.; RODRIGUES, T. H. S.; MENEZES, J. E. S. A. Biotransformation of volatile compounds of the leaves of *Schinus terebinthifolius* by caterpillar *Automeris Hubner*. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 8, p. 56053–56063, ago. 2020. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/14686>. Acesso em: 13 nov. 2025.

MARTINS, C. H. Z.; TRIGO, J. R. Pyrrolizidine alkaloids in the pericopine moth *Scearctia figulina* (Erebidae): metabolism and chemical defense. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 27, n. 8, p. 1437–1443, ago. 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/jbchs/a/OpWCKRmB8jKPnjxkjJHfJdL/?lang=en>. Acesso em: 5 nov. 2025.

MEYER, U. A. Overview of enzymes of drug metabolism. **Journal of Pharmacokinetics and Biopharmaceutics**, v. 24, p. 449–459, out. 1996. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02353473>. Acesso em: 28 nov. 2025.

NAUEN, R.; BASS, C.; FEYEREISEN, R.; VONTAS, J. The role of cytochrome P450s in insect toxicology and resistance. **Annual Review of Entomology**, v. 67, p. 105–124, jan. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-070621-061328>. Acesso em: 28 nov. 2025.

PENTZOLD, S.; ZAGROBELNY, M.; ROOK, F.; BAK, S. How insects overcome two-component plant chemical defence: plant β -glucosidases as the main target for herbivore adaptation. **Biological Reviews**, v. 89, n. 3, p. 531–551, ago. 2014. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25165798/>. Acesso em: 22 nov. 2025.

PEREIRA, D. M.; NOITES, A.; VALENTÃO, P.; FERRERES, F.; PEREIRA, J. A.; VALE-SILVA, L.; PINTO, E.; ANDRADE, P. B. Targeted metabolite analysis and biological activity of *Pieris brassicae* fed with *Brassica rapa* var. *rapa*. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 57, n. 2, p. 483–489, fev. 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/jf8031638>. Acesso em: 02 nov. 2025.

PRIESTAP, H. A.; VELANDIA, A. E.; JOHNSON, J. V.; BARBIERI, M. A. Secondary-metabolite uptake by the *Aristolochia*-feeding papilionoid butterfly *Battus polydamas* (Lepidoptera: Papilionidae: Troidinii). **Biochemical Systematics and Ecology**, v. 40, p. 126–137, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.bse.2011.10.006>. Acesso em: 23 nov. 2025.

RAMOS, C. S.; BARBOSA, Q. P. S.; VANIN, S. A. Metabolism of safrole by *Heraclides thoas brasiliensis* (Papilionidae). **The Journal of the Lepidopterists' Society**, v. 68, n. 4, p. 283–285, dez. 2014. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/002675940>. Acesso em: 19 nov. 2025.

RAMOS, C. S.; SILVA, M. W. F.; MORAES, M. M.; KATO, M. J. Metabolism of (-)-grandisin from *Piper solmsianum* in Coleoptera and Lepidoptera species. **Phytochemistry**, v. 69, n. 18, p. 3120–3129, ago. 2008. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/001688358>. Acesso em: 19 nov. 2025.

RAMOS, C. S.; SILVA, R. R.; SILVA, F. P.; SANTOS, M. S.; SILVA, L. R.; VIANA, L. L.; MELO, J. G.; ALMEIDA, L. H.; GUERRA, P. E.; NUNES, A. C.; OLIVEIRA, A. H.; LEITE, A. R.; OLIVEIRA-FILHO, J.; LOPES, E.; PAULA, A. M. Isomerization of (Z)-asarone to (E)-asarone from *Piper marginatum* leaves by the *Quadrus u-lucida* larvae. **Phytochemistry Letters**, v. 47, p. 164–167, jan. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1874390021002743>. Acesso em: 19 nov. 2025.

RAMOS, C. S.; SOUZA, L. de J.; KATO, M. J.; BATISTA, R. Biotransformation of 4-nerolidylcatechol by *Heraclides brasiliensis* (Lepidoptera: Papilionidae) reduces the toxicity of *Piper umbellata* (Piperaceae). **Chemoecology**, v. 22, n. 1, p. 39–45, nov. 2012. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/002324726>. Acesso em: 28 de out. 2025.

SCHNEIDEWIND, F. C. C. do P.; CASTILHO, P. F. de; GALVÃO, F.; SANTOS, J. V. de A. dos; DANTAS, F. G. da S.; NEGRI, M.; PINTO, L. da S.; MORAES, C. A. F.; FREITAS, J.; SOUZA, P. R. B. de; NOGUEIRA, C. R.; OLIVEIRA, K. M. P. de. Effects of bioconversion by *Battus polydamas* on the chemical composition of *Aristolochia* spp. and evaluation of antimicrobial activity and biocompatibility. **Fitoterapia**, v. 175, art. 105949, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fitote.2024.105949>. Acesso em: 23 nov. 2025.

SUCHAN, T.; ÁLVAREZ, N. Fifty years after Ehrlich and Raven, is there support for plant–insect coevolution as a major driver of species diversification? **Entomologia Experimentalis et Applicata**, 157(1), 98–112, set. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/eea.12348>. Acesso em: 9 de out. 2025.

TRIGO, J. R. The chemistry of antipredator defense by secondary compounds in neotropical Lepidoptera: facts, perspectives and caveats. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 11, n. 6, p. 551–561, dez. 2000. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-50532000000600002>. Acesso em: 05 nov. 2025.

TRIGO, J. R.; BROWN, K. S. JR.; WITTE, L.; HARTMANN, T.; ERNST, L.; BARATA, L. E. S. Pyrrolizidine alkaloids: different acquisition and use patterns in Apocynaceae and Solanaceae feeding Ithomiinae butterflies (Lepidoptera: Nymphalidae). **Biological Journal of the Linnean Society**, v. 58, n. 1, p. 99-123, mai. 1996. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0024406696900280>. Acesso em: 5 nov. 2025.

VENTHUR, H.; LIZANA, M.; MANOSALVA, P.; ROJAS, A.; GODOY, M.; ROCHA, M.; AGUILERA, J.; PALMA-MILLANAO, P.; FAJARDO, S.; QUIROZ, A.; MUTIS, A. Analysis of glutathione-S-transferases from larvae of *Galleria mellonella* (Lepidoptera, Pyralidae) with potential alkaloid detoxification function. **Frontiers in Physiology**, v. 13, p. 989006, set. 2022. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36148307/>. Acesso em: 2 nov. 2025.

VON NICKISCH-ROSENEGK, E.; WINK, M. Sequestration of pyrrolizidine alkaloids in several arctiid moths (Lepidoptera: Arctiidae). **Journal of Chemical Ecology**, v. 19, n. 9, p. 1889-1903, set. 1993. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00983794>. Acesso em: 2 nov. 2025.

WAHLBERG, N. The phylogenetics and biochemistry of host-plant specialization in Melitaeine butterflies (Lepidoptera: Nymphalidae). **Evolution**, v. 55, n. 3, p. 522–537, mar. 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.0014-3820.2001.tb00786.x>. Acesso em: 19 nov. 2025.

WU, C.; CHAKRABARTY, S.; JIN, M.; LIU, K.; XIAO, Y. Insect ATP-Binding Cassette (ABC) Transporters: Roles in Xenobiotic Detoxification and Bt Insecticidal Activity. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 20, n. 11, p. 2829, jun. 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1422-0067/20/11/2829>. Acesso em: 28 nov. 2025.

ZHANG, N.; QIAN, Z.; HE, J.; SHEN, X.; LEI, X.; SUN, C.; FAN, J.; FELTON, G. W.; SHAO, Y. Gut bacteria of lepidopteran herbivores facilitate digestion of plant toxins. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 121, n. 42, out. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1073/pnas.2412165121>. Acesso em: 23 nov. 2025.