



**ATTI**  
DELLA  
**ACCADEMIA**  
**NAZIONALE ITALIANA**  
**DI ENTOMOLOGIA**

**RENDICONTI**  
Anno LXX  
2022



FIRENZE



ATTI  
DELLA  
ACCADEMIA  
NAZIONALE ITALIANA  
DI ENTOMOLOGIA

RENDICONTI

Anno LXX

2022



FIRENZE

ISSN 0065-0757

Direttore Responsabile: *Prof. Francesco Pennacchio*  
Presidente Accademia Nazionale Italiana di Entomologia

Coordinatore della Redazione: *Dr. Roberto Nannelli*

La responsabilità dei lavori pubblicati è esclusivamente degli autori  
Registrazione al Tribunale di Firenze n. 5422 del 24 maggio 2005

## INDICE

### Rendiconti

Consiglio di Presidenza . . . . .	Pag.	7
Elenco degli Accademici . . . . .	»	8
Verbali delle adunanze del 11 e 12 marzo 2022 . . . . .	»	11
Verbali delle adunanze del 10 e giugno 2022 . . . . .	»	16
Verbali delle adunanze del 18 e 19 novembre 2022 . . . . .	»	20

### Commemorazioni

VLADIMÍR KOŠTÁL – <i>Life and work of Ivo Hodek – famous Czech entomologist</i> . . . . .	»	29
STEFANO TURILLAZZI, DONATO A. GRASSO – <i>Un ricordo di E.O. Wilson (1929-2021)</i> . . . . .	»	31

### Lecture

STEFANO COLAZZA – <i>In che modo l'ecologia chimica può contribuire a migliorare il controllo biologico conservativo?</i> . . . . .	»	37
LUCIA ZAPPALÀ – <i>Food webs in biological pest control</i> . . . . .	»	39
MARIA LUISA DINDO – <i>Ditteri tachinidi parassitoidi misconosciuti: biologia e interesse come insetti ausiliari</i> . . . . .	»	45

### Tavola Rotonda su:

CONSERVAZIONE E MONITORAGGIO DEGLI INSETTI SAPROXILICI . . . . .	»	51
ALESSANDRO CAMPANARO, FRANCO MASON, MARCO BARDIANI, SÖNKE HANDERSEN, FRANCESCO PARISI, PIO FEDERICO ROVERSI – <i>Conservazione e monitoraggio degli insetti saproxilici</i> . . . . .	»	53

### Tavola Rotonda su:

BIOLOGICAL PEST CONTROL: MANAGING MULTITROPHIC INTERACTIONS FOR SUSTAINABLE AGRICULTURE . . . . .	»	59
JOSEP A. JAQUES – <i>Impact of climate change on invertebrate biological control</i> . . . . .	»	61
SAMIRA A. MOHAMED, REHEMAH GWOKYALYA, SAHADATOU MAMA SAMBO, SHEPARD NDLELA, ABDELMUTALAB GESMALLA, FRANCIS OBALA, PASCAL AIGBEDION-ATALOR, PASCAL AYELO, SUNDAY EKESI – <i>Recent advances in classical biological control of key horticulture pests: African perspective</i> . . . . .	»	65
LUCIANA TAVELLA – <i>Classical and fortuitous biological control</i> . . . . .	»	71
LORENZO MARINI – <i>Landscape-scale management of pest natural enemies</i> . . . . .	»	77
EMILIO GUERRIERI – <i>Manipulating belowground-aboveground interactions to enhance plant defence</i> . . . . .	»	81
ANTONIO BIONDI – <i>The non-target effects of insecticides on natural enemies</i> . . . . .	»	89

### Tavola Rotonda su:

EDIBLE INSECTS: FROM BIOLOGY TO APPLICATIONS . . . . .	»	91
ARNOLD VAN HUIS – <i>Progress and challenges of insects as food and feed</i> . . . . .	»	93
MORENA CASARTELLI – <i>Studio della fisiologia dell'intestino medio di Hermetia illucens</i> . . . . .	»	95
GIANLUCA TETTAMANTI – <i>Il sistema immunitario della mosca soldato, Hermetia illucens</i> . . . . .	»	101
JEROEN DE SMET – <i>The fate of food pathogens during black soldier fly rearing</i> . . . . .	»	107
SARA RUSCHIONI, NUNZIO ISIDORO, PAOLA RIOLO – <i>Rearing of Tenebrio molitor and its implication for human consumption</i> . . . . .	»	111
MORITZ GOLD, ALEXANDER MATHYS – <i>Waste recycling with fly larvae: from science to practice</i> . . . . .	»	115
LARA MAISTRELLO – <i>Insects as tools for making circular economy in applied research projects</i> . . . . .	»	119



ANNO ACCADEMICO

2022

CONSIGLIO DI PRESIDENZA

---

PRESIDENTE

PENNACCHIO Prof. Dott. Francesco

VICE-PRESIDENTE

FAUSTO Prof. Dott.sa Anna Maria

SEGRETARIO

CERVO Prof. Dott.sa Rita

TESORIERE

NANNELLI Dott. Roberto

## ELENCO DEGLI ACCADEMICI

### ACCADEMICI SENIORES

ARZONE Prof. Dott. Alessandra	- Torino	1984
BALLETTO Prof. Dott. Emilio	- Torino	2016 - 2020
BARBAGALLO Prof. Dott. Sebastiano	- Catania	1982
BINAZZI Dott. Andrea	- Firenze	1998 - 2011
BONVICINI Pagliai Prof. Dott. Anna	- Modena	1983 - 2001
BRIOLINI Prof. Dott. Giovanni	- Bologna	1977 - 1982
BULLINI Prof. Dott. Luciano	- Roma	1986
COBOLLI Prof. Dott. Marina	- Roma	2001 - 2018
CRAVEDI Prof. Dott. Piero	- Piacenza	1999 - 2005
DELRIO Prof. Dott. Gavino	- Sassari	1989 - 2000
FRILLI Prof. Dott. Franco	- Udine	1978 - 1982
GASPERI Prof. Dott. Giuliano	- Pavia	2005 - 2013
GIORDANA Prof. Dott. Barbara	- Milano	1997 - 2003
GIROLAMI Prof. Dott. Vincenzo	- Padova	1993 - 2004
LONGO Prof. Dott. Santi	- Catania	1995 - 2021
MALVA Dott. Carla	- Napoli	2001 - 2010
MAROLI Prof. Dott. Michele	- Roma	2003 - 2010
MASUTTI Prof. Dott. Luigi	- Padova	1972 - 1977
MAZZINI Prof. Dott. Massimo	- Viterbo	2000
MELLINI Prof. Dott. Egidio	- Bologna	1962 - 1972
NUZZACI Prof. Dott. Giorgio	- Bari	1988 - 1994
OLMI Prof. Dott. Massimo	- Viterbo	2002 - 2013
OSELLA Prof. Dott. Giuseppe Bartolomeo <sup>1</sup>	- L'Aquila	1983 - 1997
RAGUSA di Chiara Prof. Dott. Salvatore	- Palermo	1993 - 2000
RIVOSCECCHI Prof. Dott. Leo <sup>2</sup>	- Roma	1987 - 2003
ROTUNDO Prof. Dott. Giuseppe	- Campobasso	1999 - 2010
SANTINI Prof. Dott. Luciano	- Pisa	1993 - 2000
SBORDONI Prof. Dott. Valerio	- Roma	1986
SOLINAS Prof. Dott. Mario	- Perugia	1978
SÜSS Prof. Dott. Luciano	- Milano	1987 - 1993
TRANFAGLIA Prof. Dott. Antonio	- Potenza	1993 - 2021
TRIGGIANI Prof. Oreste	- Bari	2001 - 2011

### ACCADEMICI ORDINARI

ALMA Prof. Dott. Alberto	- Torino	2007 - 2013
AUDISIO Prof. Paolo Aldo	- Napoli	2004 - 2015
BALLERIO Dott. Alberto	- Brescia	2015 - 2020
BANDI Prof. Dott. Claudio	- Milano	2015 - 2022
BATTISTI Prof. Andrea	- Padova	2010 - 2014
BIONDI Prof. Dott. Maurizio	- L'Aquila	2012 - 2019
BOLOGNA Prof. Dott. Marco	- Roma	2001 - 2008
BOSCO Prof. Dott. Domenico	- Torino	2015 - 2021
BRANDMAYR Prof. Dott. Pietro	- Rende (CS)	2005 - 2014

1 - † 16 marzo 2022

2 - † 18 dicembre 2022



CASALE Prof. Dott. Achille	- Sassari	1996 - 2002
CERVO Prof. Dott. Rita	- Firenze	2012 - 2018
COLAZZA Prof. Dott. Stefano	- Palermo	2013 - 2019
CRISTOFARO Dott. Massimo	- Roma	2014 - 2022
DE LILLO Prof. Dott. Enrico	- Bari	2011 - 2018
DIGILIO Pro. Dott. Maria Cristina	- Napoli	2015 - 2022
DI PALMA Prof. Dott. Antonella	- Foggia	2014 - 2020
FAUSTO Prof. Dott. Anna Maria	- Viterbo	2011 - 2016
FLORIS Prof. Dott. Ignazio	- Sassari	2011 - 2017
FRATI Prof. Dott. Francesco	- Siena	2011 - 2016
GARGIULO Prof. Dott. Giuseppe	- Bologna	2013 - 2019
GERMINARA Prof. Giacinto Salvatore	- Foggia	2014 - 2021
ISIDORO Prof. Dott. Nunzio	- Ancona	2013 - 2020
LUCCHI Prof. Dott. Andrea	- Pisa	2015 - 2022
LUCIANO Prof. Dott. Pietro	- Sassari	2009 - 2014
MAINI Prof. Dott. Stefano	- Bologna	2005 - 2014
MASSA Prof. Dott. Bruno	- Palermo	2011 - 2017
MINELLI Prof. Dott. Alessandro	- Padova	1986 - 1993
NANNELLI Dott. Roberto	- Firenze	1998 - 2005
NAZZI Prof. Dott. Francesco	- Udine	2012 - 2019
PELLIZZARI Prof. Dott. Giuseppina	- Padova	2011 - 2018
PENNACCHIO Prof. Dott. Francesco	- Napoli	2001 - 2007
POGGI Dott. Roberto	- Genova	1989 - 1999
RAPISARDA Prof. Dott. Carmelo	- Catania	2005 - 2012
ROVERSI Prof. Dott. Pio Federico	- Firenze	2008
RUSSO Prof. Dott. Agatino	- Catania	2011 - 2017
TURILLAZZI Prof. Dott. Stefano	- Firenze	1989 - 2000
ZAPPAROLI Prof. Dott. Marzio	- Viterbo	2012 - 2019

#### ACCADEMICI ONORARI

ALTIERI PROF. MIGUEL ANGEL	- Berkeley (USA)	2004
BEUTEL Prof. Dott. Rolf G.	- Jena (Germania)	2018
CRISANTI Prof. Dott. Andrea	- Padova	2020
DALLAI Prof. Dott. Romano	- Siena	2022
GATEHOUSE Prof. Angharad M.R.	- Newcastle (U.K.)	2015
HARRIS Dott. Keit Murray	- Ripley, Woking (U.K.)	2002
LENTEREN Prof. Dott. Johan Coert van	- Wageningen (Olanda)	2006
TAUTZ Prof. Dott. Jürgen	- Würzburg (Germania)	2006
VIGGIANI Prof. Dott. Gennaro	- Napoli	2020

#### ACCADEMICI STRAORDINARI

ANFORA Prof. Dott. Gianfranco	- Trento	2020
BEANI Prof. Dott. Laura	- Firenze	2021
BARTOLOZZI Dott. Luca	- Firenze	2022
BONELLI Prof. Dott. Simona	- Torino	2021
BURGIO Prof. Dott. Giovanni	- Bologna	2018
CARAPELLI Prof. Dott. Antonio	- Siena	2020
CASARTELLI Prof. Dott. Morena	- Milano	2020

CONTI Prof. Dott. Barbara	- Pisa	2019
CONTI Prof. Dott. Eric	- Perugia	2018
DANI Prof. Dott. Francesca Romana	- Firenze	2022
DAPPORTO Prof. Dott. Leonardo	- Firenze	2018
DI GIULIO Prof. Dott. Andrea	- Roma	2019
DINDO Prof. Dott. Maria Luisa	- Bologna	2019
DUSO Prof. Dott. Carlo	- Padova	2016
FACCOLI Prof. Dott. Massimo	- Padova	2020
FANCIULLI Prof. Dott. Pietro Paolo	- Siena	2019
GARONNA Prof. Dott. Antonio Pietro	- Napoli	2016
GRASSO Prof. Dott. Donato	-Parma	2020
GUERRIERI Prof. Dott. Emilio	- Napoli	2019
MARINI Prof. Lorenzo	- Padova	2022
MASON Dott. Franco	- Verona	2019
MAZZONI Prof. Dott. Emanuele	- Piacenza	2018
PALMERI Prof. Dott. Vincenzo	- Reggio Calabria	2021
PANTALEONI Prof. Dott. Roberto	- Sassari	2016
PERI Prof. Ezio	- Palermo	2022
ROMANI Prof. Dott. Roberto	- Perugia	2018
SABBATINI Peverieri Dott. Giuseppino	- Firenze	2020
SIMONI Dott. Sauro	- Firenze	2018
SISCARO Prof. Dott. Gaetano	- Catania	2018
TAVELLA Prof. Dott. Luciana	- Torino	2018
TREMATERRA Pro, Dott. Pasquale	- Campobasso	2021
TSOLAKIS Prof. Dott. Haralabos	- Palermo	2018
VANIN Prof. Dott. Stefano	- Huddersfield (UK)	2018
ZAPPALÀ Prof. Dott. Lucia	- Catania	2019

N.B. - Per gli Accademici seniores ed ordinari le date sono rispettivamente quelle della nomina ad Accademico straordinario e ad Accademico ordinario.

## VERBALI DELLE ADUNANZE DEL 11 E 12 MARZO 2022

Presiede il Presidente Prof. Francesco PENNACCHIO  
Segretario verbalizzante la Segretaria Prof.ssa Rita CERVO

### SEDUTA PUBBLICA

Venerdì 11 marzo 2022 alle ore 14: 15, a Firenze Cascine del Riccio, via Lanciola 12/A e su piattaforma (<https://ministeropoliticheagricolealimentarieforestali.webex.com/ministeropoliticheagricolealimentarieforestali/j.php?MTID=mfe5ee154c824d1c9233ec1210a9a041>) iniziano i lavori della Seduta pubblica:

Sono presenti i seguenti Accademici:

*Seniores*: E. BALLETO, M. COBOLLI, R. DALLAI, G. GASPERI, S. LONGO, M. MAROLI, G. ROTUNDO, V. SBORDONI, M. SOLINAS

*Ordinari*: P. AUDISIO, A. BALLERIO, A. BATTISTI, M. BIONDI, M. BOLOGNA, P. BRANDMAYER, R. CERVO, S. COLAZZA, E. DE LILLO, A. DI PALMA, A.M. FAUSTO, I. FLORIS, G.S. GERMINARA, A. LUCCHI, S. MAINI, B. MASSA, R. NANNELLI, F. PENNACCHIO, R. POGGI, F.P. ROVERSI, S. TURILLAZZI, M. ZAPPAROLI

*Straordinari*: G. ANFORA, L. BEANI, S. BONELLI, G. BURGIO, A. CARAPELLI, M. CASARTELLI, E. CONTI, A. DI GIULIO, M.L. DINDO, M. FACCOLI, A.P. GARONNA, D.A. GRASSO, F. MASON, E. MAZZONI, V. PALMERI, G. SABBATINI, G. SISCARO, P. TREMATERRA, L. ZAPPALÀ.

Hanno giustificato la propria assenza gli Accademici:

*Seniores*: P. CRAVEDI, L. SANTINI, L. SUSS; *Ordinari*: A. ALMA, A. CASALE, G. GARGIULO, P. LUCIANO, M. MAZZINI; *Onorari*: A. CRISANTI; *Straordinari*: B. CONTI, M.C. DIGILIO, C. DUSO, S. SIMONI, L. TAVELLA, S. VANIN.

Alla Seduta Pubblica sono presenti anche numerosi ricercatori e studiosi ospiti dell'Accademia.

Il tema della Tavola Rotonda verte su: *Conservazione e monitoraggio degli insetti saproxilici*

Coordinata dall'Accademico FRANCO MASON e da ALESSANDRO CAMPANARO (CREA Centro di ricerca Difesa e Certificazione)

- Presentazione del Presidente Francesco PENNACCHIO
- Introduzione dell'Accademico FRANCO MASON

#### *Interventi:*

- PIO FEDERICO ROVERSI (Istituto Nazionale di Riferimento per la Protezione delle Piante e Accademico ordinario): *Gli Insetti saproxilici nella Storia delle Scienze della Natura*
- FRANCO MASON (già Direttore del Centro Nazionale Biodiversità Forestale Carabinieri di Verona e Accademico straordinario): *Il legno morto, una chiave per la conservazione della biodiversità*
- ALESSANDRO CAMPANARO (CREA Centro di ricerca Difesa e Certificazione): *Gli insetti saproxilici: biologia, ecologia, conservazione*

- SÖNKE HARDERSEN (Centro Nazionale Biodiversità Forestale Carabinieri di Verona): *Lo sviluppo di protocolli di monitoraggio per coleotteri saproxilici della Direttiva Habitat*
- MARCO BARDIANI (Centro Nazionale Biodiversità Forestale Carabinieri di Verona): *15 anni di studi sul cervo volante: l'esperienza di Bosco Fontana*
- FRANCESCO PARISI (GeoLAB - Laboratorio di Geomatica Forestale, Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agrarie, Alimentari, Ambientali e Forestali, Università degli Studi di Firenze): *Coleotteri saproxilici e indicatori di biodiversità in ecosistemi forestali dell'Appennino, il caso degli open dataset per la conservazione.*

Segue un'interessante discussione, coordinata dall'Accademico FRANCO MASON, al termine della quale la Seduta si conclude alle ore 18,30

I testi delle relazioni saranno pubblicati sugli Atti-Rendiconti 2022 dell'Accademia.

*Segretario verbalizzante*  
Rita CERVO

*Il Presidente*  
Francesco PENNACCHIO

## ASSEMBLEA PLENARIA

Presiede il Presidente Prof. Francesco PENNACCHIO  
Segretario verbalizzante la Segretaria Prof.ssa Rita CERVO

Sabato 12 marzo 2022 alle ore 09:30, a Firenze Cascine del Riccio, via Lanciola 12/A e su piattaforma Zoom (<https://us06web.zoom.us/j/81339455887?pwd=aUtLaVaN1JmZUp-QUkhIWmNzYzNjUT09>) come da convocazione del Presidente, iniziano i lavori dell'Assemblea Plenaria alla presenza degli Accademici:

*Seniores:* E. BALLETO, M. COBOLLI, R. DALLAI, S. LONGO, M. MAROLI, L. SANTINI, V. SBORDONI, M. SOLINAS

*Ordinari:* A. BALLERIO, A. BATTISTI, M. BOLOGNA, D. BOSCO, R. CERVO, S. COLAZZA, E. DE LILLO, A.M. FAUSTO, I. FLORIS, F. FRATI, G.S. GERMINARA, S. MAINI, B. MASSA, R. NANNELLI, F. NAZZI, F. PENNACCHIO, R. POGGI, S. TURILLAZZI, M. ZAPPAROLI

*Straordinari:* G. ANFORA, L. BEANI, S. BONELLI, G. BURGIO, A. CARAPELLI, M. CASARTELLI, E. CONTI, A. DI GIULIO, M.L. DINDO, C. DUSO, M. FACCOLI, A. P. GARONNA, D.A. GRASSO, F. MASON, E. MAZZONI, V. PALMERI, G. SABBATINI, S. SIMONI, G. SISCARO, P. TREMATERRA, H. TSOLAKIS, L. ZAPPALA'.

Hanno giustificato la propria assenza gli Accademici:

*Seniores:* A. BINAZZI, P. CRAVEDI; *Ordinari:* A. ALMA, A. CASALE, P. LUCIANO, M. MAZZINI;

*Straordinari:* B. CONTI, L. TAVELLA, S. VANIN.

Viene discusso il seguente Ordine del Giorno:

1) Approvazione del verbale della Seduta precedenti (19 e 20 novembre 2021)

- Viene esaminato il verbale della Seduta Plenaria dell'20 novembre 2021, già inviato a suo tempo per posta elettronica agli Accademici. Il verbale viene approvato all'unanimità.

2) Comunicazioni del Presidente

- Il Presidente informa che in aprile verrà emesso il bando per il Premio Osella e successivamente verrà nominata la Commissione giudicatrice.
- Il Presidente informa gli Accademici che la prima edizione dell'assegnazione del Premio Silvestri si terrà presumibilmente nel 2024.

### 3) Pubblicazioni dell'Accademia

- Il Presidente informa che la stampa del volume degli Atti dell'Accademia del 2021 è a buon punto mentre non è stato possibile realizzare la monografia relativa alla Tavola Rotonda del 5 novembre coordinata dall'Accademico ANTONIO CARAPELLI.
- Il Presidente descrive lo stato di avanzamento del progetto editoriale per la realizzazione di un'opera in più volumi, riguardanti i diversi ambiti dell'Entomologia e destinata alla didattica universitaria e post-universitaria. Inoltre, viene descritta la bozza contrattuale con l'editore Liguori. È prevista una riunione operativa in primavera (maggio).

### 4) XXVII Congresso Nazionale Italiano di Entomologia

- Il Presidente invita l'Accademico STEFANO COLAZZA a fornire un aggiornamento sull'organizzazione del 27° Congresso Nazionale di Entomologia. L'Accademico STEFANO COLAZZA prende la parola e mostra all'Assemblea la 1° circolare completata, il Logo del convegno e informa che è stato acquistato il dominio per congresso ([www.cnie2023palermo.com](http://www.cnie2023palermo.com)). Illustra inoltre le varie sessioni scientifiche previste nel programma e informa che l'organizzazione del Congresso sarà gestita come di consueto dall'Event Planet Group.

### 5) Fauna d'Italia

- Su richiesta del Presidente dell'ANIE, prende la parola l'Accademico prof. MARCO A. BOLOGNA, Presidente del Comitato Scientifico per la Fauna d'Italia, relazionando sulle attività del CSFI. La situazione della stampa dei volumi della collana Fauna d'Italia è nuovamente critica. Infatti, il I volume sui lepidotteri "ropaloceri" a cura dell'accademico prof. Emilio Balletto e collaboratori, pur essendo stata conclusa la correzione delle bozze e tutte le piccole revisioni richieste, non è stato ancora dato alla stampa. Il rapporto con la casa editrice Calderini appare sempre più complesso ed il Comitato Scientifico sta valutando la possibilità di rescissione dei rapporti editoriali. Rimango in fase di preparazione altri tre volumi: Neuropterida, a cura dell'Accademico prof. Roberto A. Pantaleoni e collaboratori; Dermaptera, a cura del Dott. Paolo Fontana ed altri; Chondrichthyes, a cura del Dott. Fabrizio Serena e collaboratori. La preparazione degli altri volumi previsti (Cephalopoda, a cura del Dott. G. Bello e collaboratori; Psylloidea, a cura dell'accademico prof. Carmelo Rapisarda ed altri; Diptera Tachinidae, a cura del prof. Pierfilippo Cerretti; Calanoida a cura del prof. Genuario Belmonte ed altri colleghi), è invece ancora arretrata.

Per quanto attiene invece la redazione della nuova Checklist della Fauna d'Italia, dando seguito all'accordo con LifeWatch, nel cui sito è stato costruito un mini-sito del CSFI, è stato completato l'inserimento nella piattaforma sperimentale di numerose checklist di tanti taxa di Metazoa per un complesso di 27.500 specie; tali checklist sono già consultabili e scaricabili nelle modalità che sono state riferite all'Accademia nella seduta di novembre 2021. La piattaforma definitiva è prevista per l'inizio del 2023 con modalità di interazione molto più avanzate. Nel frattempo, si stanno raccogliendo, e saranno inserite a breve, altre checklist di famiglie di lepidotteri, imenotteri e coleotteri (circa altre 3200). Non si è ancora provveduto ad attivare le nuove richieste ad ulteriori specialisti per checklist di taxa non ancora trattati. A seguito dell'accordo con il giornale internazionale Biogeographia (Società Italiana di Biogeografia) è iniziata la pubblicazione di un lavoro introduttivo sulla Checklist e di alcuni data-paper relativi a singole checklist (Rotiferi, Molluschi, Chilopodi). Una decina di altri data-paper è in fase di completamento e stampa.

L'Accademico MARCO A. BOLOGNA alla fine della sua relazione condivide con l'Assemblea la sua preoccupazione relativa alla difficoltà, sempre maggiore, di reperire esperti in sistematica e ai problemi emersi per portare avanti il lavoro sulle checklist. Molti Accademici intervengono condividendo le preoccupazioni esposte dal Presidente del CSFI e propongono che l'Accademia stili un documento da inviare al Ministero per far presente il problema. Il Presidente prende atto della proposta.

6) Proclamazione e consegna dei diplomi ai nuovi Accademici

- Le votazioni effettuate lo scorso mese di novembre hanno sancito l'ingresso nella Accademia Nazionale Italiana di Entomologia dei seguenti accademici:

Ordinari: C. BANDI, A. LUCCHI;

Straordinari: L. BEANI, S. BONELLI, V. PALMERI, P. TREMATERRA

A tutti le nostre congratulazioni e un caloroso saluto di benvenuto.

- Il Presidente consegna i diplomi agli Accademici neo-eletti presenti (L. BEANI, S. BONELLI, V. PALMERI) e i diplomi agli Accademici presenti eletti l'anno precedente che, per motivi della pandemia legata al Covid, non li hanno potuti ritirare (A. CARAPELLI, A.D. GRASSO, M. FACCOLI, Rimangono da consegnare i diplomi ai seguenti Accademici: A. CRISANTI, D.BOSCO, G.S. GERMINARA, G. VIGIANI, G. ANFORA.

7) Conferma programma delle Sedute per l'A.A. 2022 e del 2023

- Il Presidente illustra le variazioni sul programma delle prossime Adunanze del 2022 e chiede conferma agli Accademici coinvolti nelle attività.
- Adunanze di 17 e 18 giugno 2022:  
Tavola Rotonda su “Biological pest control: managing multitrophic interactions for sustainable agriculture” coordinata dall'Accademica LUCIA ZAPPALÀ e GAETANO SISCARO  
Lettura “Food webs in biological pest control” che sarà tenuta dall'Accademica LUCIA ZAPPALÀ  
Commemorazione di I. HODEK tenuta dai Dr. Vladimir Kostal e Olda Nedved
- Adunanze di novembre 2022:  
Tavola Rotonda su “Gli insetti nei processi di bioconversione: biologia e applicazioni” coordinata dall'Accademica MORENA CASARTELLI  
Lettura “Ditteri Tachinidi, parassitoidi misconosciuti: interazioni con l'ospite e interesse come insetti ausiliari” che sarà tenuta dall'Accademica MARIA LUISA DINDO  
Commemorazione di E. O. WILSON degli accademici S. TURILLAZZI, M. SOLINAS e D.A. GRASSO

8) Varie ed eventuali

Chiede la parola l'Accademico E. DE LILLO per aggiornare l'Assemblea circa il prossimo Convegno di Acarologia invitando gli accademici a partecipare.

Di seguito prende la parola l'Accademico P. ROVERSI per informare l'Assemblea riguardo alla creazione di 3 laboratori nazionali di riferimento da parte del ministero delle Politiche agricole e alla necessità di creare un network intorno a questi laboratori.

La seduta dell'Assemblea Plenaria è tolta alle ore 11

### SEDUTA PUBBLICA

Sabato 12 marzo 2022 alle ore 11, presso la propria sede in via Lanciola 12/A Cascine del Riccio, Firenze e su piattaforma ZOOM (<https://us06web.zoom.us/j/81339455887?pwd=aUt-LaIVaN1JmZUpQUkhIWmNzYzNjUT09>) il Presidente Francesco PENNACCHIO dichiara aperta la Seduta Pubblica.

Oltre agli Accademici presenti all'Assemblea Plenaria, partecipano altri studiosi e ricercatori ospiti dell'Accademia.

Il Presidente invita l'Accademico STEFANO COLAZZA a presentare la lettura dal titolo: “*Chemical Ecology of Floral Resources in a Conservation Biological Context*”

Segue un'interessante discussione, al termine della quale il Presidente ringrazia il relatore e coloro che sono intervenuti.

Il testo della lettura sarà pubblicato sugli Atti-Rendiconti 2022.

La Seduta è tolta alle ore 11:30.

### ASSEMBLEA ORDINARIA

Presiede il Presidente Prof. Francesco PENNACCHIO  
Segretario verbalizzante: la Segretaria Prof. ssa Rita CERVO

Sabato 12 marzo 2022 alle ore 11:30, a Firenze Cascine del Riccio, via Lanciola 12/A e su piattaforma (<https://us06web.zoom.us/j/81339455887?pwd=aUtLalVaN1JmZUpQUkhIWmN-zYzNjUT09>) come da convocazione del Presidente, iniziano i lavori dell'Assemblea Ordinaria alla presenza degli Accademici:

*Seniores:* E. BALLETO, M. COBOLLI, R. DALLAI, S. LONGO, M. MAROLI, L. SANTINI, V. SBORDONI, M. SOLINAS

*Ordinari:* A. BALLERIO, A. BATTISTI, M. BOLOGNA, D. BOSCO, R. CERVO, S. COLAZZA, E. DE LILLO, A.M. FAUSTO, I. FLORIS, F. FRATI, G.S. GERMINARA, S. MAINI, B. MASSA, R. NANNELLI, F. NAZZI, F. PENNACCHIO, R. POGGI, S. TURILLAZZI, M. ZAPPAROLI

Hanno giustificato la propria assenza gli Accademici:

*Seniores:* A. BINAZZI, P. CRAVEDI

*Ordinari:* A. ALMA, A. CASALE, P. LUCIANO, M. MAZZINI

Viene discusso il seguente Ordine del giorno:

1) Approvazione del verbale della Seduta precedente (20 novembre 2021)

– Viene esaminato il verbale della Seduta Ordinaria del 20 novembre 2021, già inviato a suo tempo per posta elettronica agli Accademici. Il verbale viene approvato all'unanimità.

2) Comunicazioni del Presidente

– Il Presidente comunica l'attuale numero di posti disponibili:

Straordinari: 8 posti; Ordinari: 4 posti; Onorari: 7 posti.

Di questi posti, Il Consiglio di Presidenza ha ritenuto opportuno mettere in copertura con le prossime elezioni di novembre: 4 posti di Accademico Straordinario; 2 di Accademico Ordinario; 1 posto di accademico Onorario.

3) Esame e approvazione conto consuntivo anno finanziario 2021

– Prende la parola l'Accademico Roberto NANNELLI, in qualità di Tesoriere dell'Accademia, illustrando il Bilancio Consuntivo per l'a.f. 2021 già revisionato dal collegio dei Revisori dei Conti in data 7 febbraio 2022. Il Tesoriere fa presente che nel 2021 l'Accademia ha ricevuto il contributo dell'anno 2020 e quello relativo al 2021 (entrambi sono già stati rendicontati al MIBAC) conseguentemente il bilancio 2021 ha determinato un buon avanzo che sicuramente servirà per il 2022 in quanto il MIBAC ha già previsto per questo anno una riduzione rispetto al contributo del 2021. Il Tesoriere quindi illustra i diversi punti dei capitoli delle entrate e delle uscite. L'Assemblea non pone rilievi ed approva all'unanimità.

4) Varie ed eventuali

Nessuna

La Seduta è tolta alle ore 12.

Firenze, 12 marzo 2022

*Il Segretario verbalizzante*  
Rita CERVO

*Il Presidente*  
Francesco PENNACCHIO

## VERBALI DELLE ADUNANZE DEL 10 E 11 GIUGNO 2022

Presiede il Presidente Prof. Francesco PENNACCHIO  
Segretario verbalizzante la Segretaria Prof.ssa Rita CERVO

### SEDUTA PUBBLICA

Venerdì 10 giugno 2022 alle ore 15:00, a Firenze Palazzo Nonfinito, via del Proconsolo 12 e per via telematica su piattaforma ZOOM <https://us06web.zoom.us/j/86278146175?pwd=aVBNZEtwc2pPNHZMODZiTEwxdGE0Zz09> - Meeting ID: 862 7814 6175 Passcode: 838398

iniziano i lavori della Seduta pubblica:

Sono presenti i seguenti Accademici:

*Seniores*: E. BALLETTI, S. BARBAGALLO, S. LONGO, L. SANTINI;

*Ordinari*: A. ALMA, A. BATTISTI, M. BIONDI, R. CERVO, S. COLAZZA, A. DI PALMA, A.M. FAUSTO, G.S. GERMINARA, A. LUCCHI, S. MAINI, R. NANNELLI, F. NAZZI, F. PENNACCHIO, R. POGGI, C. RAPISARDA, A. RUSSO, S. TURILLAZZI;

*Straordinari*: L. BEANI, M. CASARTELLI, E. CONTI, M. CRISTOFARO, M.C. DIGILIO, M.L. DINDO, C. DUSO, M. FACCOLI, D.A. GRASSO, E. GUERRIERI, E. MAZZONI, V. PALMERI, R. ROMANI, S. SIMONI, G. SISCARO, L. TAVELLA P. TREMATERRA, L. ZAPPALÀ.

Hanno giustificato la propria assenza gli Accademici:

*Seniores*: M. COBOLLI, R. DALLAI, G. GASPERI

*Ordinari*: P. AUDISIO, A. BALLERIO, M. BOLOGNA, E. DE LILLO, G. GARGIULO, B. MASSA, M. ZAPPAROLI;

*Onorari*: A. CRISANTI ;

*Straordinari*: S. BONELLI, G. SABBATINI, B. CONTI.

Alla Seduta Pubblica sono presenti anche numerosi ricercatori e studiosi ospiti dell'Accademia.

Il tema della Tavola Rotonda verte su:

*Biological pest control: managing multitrophic interactions for sustainable agriculture*

Coordinata dall'Accademica LUCIA ZAPPALÀ e dall'Accademico GAETANO SISCARO (Università di Catania)

- Opening by the President FRANCESCO PENNACCHIO
- *Introduction* by LUCIA ZAPPALÀ and GAETANO SISCARO (Università di Catania, Italy)
- *Impact of climate change on invertebrate biological control* (J.A. JAQUES – Universidad Jaume I, Castellon de la Plana, Spain)
- *Recent advances in classical biological control of key horticulture pests: African perspective* (S.A. MOHAMED - International Centre of Insect Physiology and Ecology, Nairobi, Kenya)
- *Classical and fortuitous biological control* (L. TAVELLA – Università di Torino, Italy)
- *Landscape-scale management of pest natural enemies* (L. MARINI – Università di Padova, Italy)
- *Manipulating belowground-aboveground interactions to enhance plant defence* (E. GUERRIERI – CNR-IPSP, Italy)
- *The non-target effects of pesticides on natural enemies* (A. BIONDI – Università di Catania, Italy)

Segue un'interessante discussione, coordinata dagli Accademici LUCIA ZAPPALÀ e GAETANO SISCARO, al termine della quale la Seduta si conclude alle ore 18,30.

I testi delle relazioni saranno pubblicati sugli Atti-Rendiconti 2022.

Segretario verbalizzante  
Rita CERVO

Il Presidente  
Francesco PENNACCHIO



## ASSEMBLEA PLENARIA

Presiede il Presidente Prof. Francesco PENNACCHIO  
Segretario verbalizzante la Segretaria Prof.ssa Rita CERVO

Sabato 11 giugno alle ore 09:30, a Firenze Palazzo Nonfinito, via del Proconsolo 12 e per via telematica su piattaforma ZOOM <https://us06web.zoom.us/j/85889463596?pwd=Q3FiT-zU3ZzIzcFI2RnRIL0EzWUs3dz09>

Meeting ID: 858 8946 3596 Passcode: 976366

come da convocazione del Presidente, iniziano i lavori dell'assemblea plenaria alla presenza degli Accademici:

*Seniores:* E. BALLETTI, S. BARBAGALLO, S. LONGO, L. SANTINI;

*Ordinari:* A. ALMA, A. BATTISTI, M. BIONDI, R. CERVO, S. COLAZZA, A. DI PALMA, A.M. FAUSTO, G.S. GERMINARA, A. LUCCHI, P. LUCIANO, S. MAINI, R. NANNELLI, F. NAZZI, F. PENNACCHIO, R. POGGI, C. RAPISARDA, A. RUSSO, S. TURILLAZZI, M. ZAPPAROLI;

*Straordinari:* G. ANFORA, L. BEANI, G. BURGIO, M. CASARTELLI, B. CONTI, E. CONTI, M. CRISTOFARO, M.C. DIGILIO, M.L. DINDO, C. DUSO, M. FACCOLI, A. P. GARONNA, D.A. GRASSO, E. GUERRIERI, E. MAZZONI, V. PALMERI, R. ROMANI, S. SIMONI, G. SISCARO, L. TAVELLA, H. TSOLAKIS, P. TREMATERRA, L. ZAPPALÀ.

Hanno giustificato la propria assenza gli Accademici:

*Seniores:* M. COBOLLI, R. DALLAI, G. GASPERI;

*Ordinari:* P. AUDISIO, A. BALLERIO, M. BOLOGNA, E. DE LILLO, G. GARGIULO, B. MASSA, P. ROVERSI;

*Onorari:* A. CRISANTI;

*Straordinari:* S. BONELLI, G. SABBATINI.

Viene discusso il seguente Ordine del Giorno:

### 1) Approvazione del verbale della Seduta precedente (11 e 12 marzo 2022)

- Viene esaminato il verbale della Seduta Plenaria dell'12 marzo 2022, già inviato a suo tempo per posta elettronica agli Accademici. Il verbale viene approvato all'unanimità.

### 2) Comunicazioni del Presidente

- Il presidente illustra brevemente quanto inoltrato all'ICE Council relativamente al Premi Silvestri.
- Il Presidente illustra le prossime attività in programma per la seduta di novembre 2022. Vengono confermate la tavola rotonda dal titolo "Gli insetti nei processi di bioconversione: biologia e applicazioni" coordinata dall'Accademica MORENA CASARTELLI, la lettura "Ditteri Tachinidi, parassitoidi misconosciuti: interazioni con l'ospite e interesse come insetti ausiliari" tenuta dall'Accademica MARIA LUISA DINDO e la commemorazione dell'Accademico Onorario E.O. WILSON tenuta dagli Accademici STEFANO TURILLAZZI, DONATO ANTONIO GRASSO.
- Il Presidente inoltre ricorda che il Consiglio di Presidenza ha ricevuto la disponibilità per:
  - o l'organizzazione di tavole rotonde nelle sedute dell'Accademia per il 2023/24 (P.P. Fanciulli: "Riproduzione, meccanismi di determinazione del sesso ed eliminazione cromosomica negli insetti"; P. Trematerra: "Contributi per la realizzazione di un indice di entomologia urbana"; G. Anfora: "Studio e integrazione di semiochimici ed altre modalità di comunicazione degli insetti (es. segnali vibrazionali) per lo sviluppo di metodi di monitoraggio e controllo multimodali");
  - o tenere delle letture (G. Anfora "Biologia, ecologia e metodi controllo di *Drosophila suzukii*, vista anche la recente iniziativa nazionale di lotta biologica classica con *Ganaspis brasiliensis*" (in alternativa a Tavola Rotonda); P. Trematerra "Sulle conoscenze dei Lepidoptera Tortricidae della fauna italiana"; M.

Faccoli: titolo da definire; G. Viggiani: titolo da definire).

- Il Presidente ricorda alcuni eventi che si terranno nei prossimi mesi: Congresso Europeo di Acarologia Bari (**12-15 luglio 2022: IX Symposium of the European Association of Acarologists**); XVIII Congresso AISASP – 7-9 settembre Sassari, sul sito della Società dove si possono trovare le informazioni del Convegno, <https://socialinsectitaly2.wixsite.com/aisasp>; 15th IOBC-MRQA Workshop – Bologna 5-9 settembre 2022). Tutte le attività verranno riportate sul sito ANIE.

### 3) Pubblicazioni dell'Accademia

Il Presidente illustra lo stadio di avanzamento della Piattaforma didattica di Entomologia. È stato completato il volume su “Sistematica ed evoluzione” e viene chiesto agli autori di caricarlo su Google Drive. Entro l'anno saranno completati anche i volumi su “Forme, strutture e funzioni” e su “Riproduzione e Sviluppo”.

È previsto il completamento entro l'anno dei seguenti volumi: “Forme, Strutture e Funzioni” e “Riproduzione e sviluppo”. Ci sono stati, inoltre, contatti con l'Editore Liguori per uniformare le immagini. Infine il Presidente comunica all'assemblea che insieme all'Accademico A. MINELLI ha avuto un contatto con la casa editrice Springer per la possibilità di tradurre l'intera opera in inglese con un sistema di traduzione automatico.

### 4) XXVII Congresso Nazionale di Entomologia di Palermo

Il Presidente invita l'Accademico S. COLAZZA a informare l'assemblea riguardo all'organizzazione del XXVII Congresso Nazionale di Entomologia che si terrà il prossimo giugno a Palermo. L'Accademico S. COLAZZA comunica che sul sito del Convegno è stata messa una lista di alberghi e che stanno decidendo i nomi degli “Invited Speakers” e, inoltre, dove effettuare la cena sociale.

### 5) Nomina della Commissione Giudicatrice del Premio Osella

Il Presidente propone i seguenti accademici quali membri della Commissione per la nomina del vincitore del Concorso per Premio Osella: C. RAPISARDA, E. MAZZONI e P. TREMATERRA. L'assemblea approva all'unanimità la Commissione proposta. Il Presidente inoltre sollecita gli Accademici di pubblicizzare il bando per stimolare l'invio di ulteriori domande.

### 6) Fauna d'Italia

Su richiesta del Presidente dell'ANIE, prende la parola l'Accademico Prof. MARCO A. BOLOGNA, Presidente del Comitato Scientifico per la Fauna d'Italia, relazionando sulle attività del CSFI. Rispetto a quanto comunicato nella precedente assemblea, non ci sono novità sostanziali sulla situazione della stampa dei volumi della collana Fauna d'Italia. A seguito di contatti con la segretaria di redazione è stato comunicato che ci sarà un impegno alla stampa del I volume sui lepidotteri “ropaloceri” a cura dell'accademico prof. EMILIO BALLETO e collaboratori. Il comitato scientifico, in una sua riunione recente del maggio scorso ha valutato la possibilità di rescissione dei rapporti editoriali. Rimangono in fase di preparazione i volumi sui Neuropterida, a cura dell'Accademico prof. ROBERTO A. PANTALEONI e collaboratori; Dermaptera, a cura del Dott. PAOLO FONTANA e altri; Chondrichthyes, a cura del Dott. FABRIZIO SERENA e collaboratori. Altri volumi sono invece in fase preliminare di preparazione, e tra questi si è aggiunta la proposta di un volume sui Policheti Sabellidi.

Per quanto attiene la redazione della nuova Checklist della Fauna d'Italia, sono state ricevute ulteriori versioni modificate di alcune liste precedentemente completate. Queste e altri aggiornamenti saranno inseriti dal gennaio 2023 sulla nuova piattaforma Lifewatch. Per la costruzione della nuova piattaforma ci sono stati incontri col prof. A. BASSET e i tecnici informatici di LifeWatch; un incontro tecnico è previsto a fine luglio a Lecce. A seguito dell'accordo con il giornale internazionale «Biogeographia» (Società Italiana di Biogeografia) sono stati stampati 8 *data-papers*, di cui si è fatto cenno nella precedente assemblea.

## 7) Varie ed eventuali

Il presidente ricorda che l'Accademico A. BATTISTI e L. MARINI stanno organizzando la scuola di analisi dei dati che si terrà a Padova nel febbraio del 2023 per un gruppo di 20-25 persone massimo. Il Presidente, inoltre, chiede la disponibilità da parte di un paio di accademici ogni anno per prendere parte all'organizzazione dell'Annual Meeting of PhD School in «Insect Science».

La seduta dell'assemblea plenaria è tolta alle ore 10.30

*Il Segretario verbalizzante*  
Rita CERVO

*Il Presidente*  
Francesco PENNACCHIO

## SEDUTA PUBBLICA

Alle ore 10.30, Il Presidente Francesco PENNACCHIO dichiara aperta la Seduta Pubblica.

Oltre agli accademici presenti all'assemblea plenaria, partecipano altri studiosi e ricercatori ospiti dell'Accademia.

Il Presidente invita l'Accademica LUCIA ZAPPALÀ a presentare la lettura dal titolo: *Food webs in biological pest control*.

Segue un'interessante discussione, al termine della quale il Presidente ringrazia il relatore e coloro che sono intervenuti.

Il testo della lettura sarà pubblicato sugli Atti-Rendiconti 2022.

Commemorazione dell'Accademico IVO HODEK dal titolo "Life and work of Ivo Hodek" tenuta dai Dr. VLADIMIR KOSTAL e OLDA NEDVED

*Il Segretario verbalizzante*  
Rita CERVO

*Il Presidente*  
Francesco PENNACCHIO

## ASSEMBLEA ORDINARIA

Presiede il Presidente Prof. Francesco PENNACCHIO  
Segretario verbalizzante: la Segretaria Prof.ssa Rita CERVO

Sabato 12 giugno alle ore 12, a Firenze Palazzo Nonfinito, via del Proconsolo 12 e per via telematica su piattaforma ZOOM <https://us06web.zoom.us/j/85889463596?pwd=Q3FiTzU3ZlZcFI2RnRIL0EzWUs3dz09>

Meeting ID: 858 8946 3596 Passcode: 976366

come da convocazione del Presidente, iniziano i lavori dell'assemblea ordinaria alla presenza degli accademici:

*Seniores:* E. BALLETO, S. BARBAGALLO, S. LONGO, L. SANTINI;

*Ordinari:* A. ALMA, A. BATTISTI, M. BIONDI, R. CERVO, S. COLAZZA, A. DI PALMA, A.M. FAUSTO, G.S. GERMINARA, A. LUCCHI, P. LUCIANO, S. MAINI, R. NANNELLI, F. NAZZI, F. PENNACCHIO, R. POGGI, C. RAPISARDA, A. RUSSO, S. TURILLAZZI, M. ZAPPAROLI;

Hanno giustificato la propria assenza gli Accademici:

*Seniores:* M. COBOLLI, R. DALLAI, G. GASPERI

*Ordinari:* P. AUDISIO, A. BALLERIO, M. BOLOGNA, E. DE LILLO, G. GARGIULO, B. MASSA, P. ROVERSI,

Viene discusso il seguente Ordine del Giorno:

1) Approvazione del verbale della seduta precedente

- a) Viene esaminato il verbale della seduta ordinaria del 12 marzo 2022, già inviato a suo tempo per posta elettronica agli accademici. Il verbale viene approvato all'unanimità.

## 2) Comunicazioni del Presidente

- a) -Il Presidente comunica che è arrivato il decreto di nomina ad accademico ordinario per Claudio Bandi e Andrea Lucchi
- b) -Il Presidente comunica le proposte ricevute dal Consiglio di Presidenza per la nomina di nuovi accademici: accademici straordinari: EZIO PERI, FRANCESCA ROMANA DANI, LORENZO MARINI, LUCA BARTOLOZZI; accademici ordinari: CRISTINA DIGILIO, MASSIMO CRISTOFARO; accademici onorari: ROMANO DALLAI.
- c) Il Presidente, inoltre, comunica all'assemblea che il Consiglio di Presidenza si rende disponibile per svolgere un secondo mandato.
- d) Il Presidente rende noto che, il 26 aprile 2022 è arrivato all'ANIE un finanziamento aggiuntivo 2021 di 2.492 euro e propone all'assemblea di investirlo in un sistema di video-audio da installare nell'aula Zocchi ubicata al CREA. La proposta viene approvata all'unanimità.

## 3) Varie ed eventuali

- a) Nessuna

La Seduta è tolta alle ore 12.30.

Firenze, 12 giugno 2022

*Il Segretario verbalizzante*  
Rita CERVO

*Il Presidente*  
Francesco PENNACCHIO

# VERBALI DELLE ADUNANZE DEL 18 E 19 NOVEMBRE 2022

Presiede il Presidente Prof. Francesco PENNACCHIO  
Segretario verbalizzante la Segretaria Prof.ssa Rita CERVO

## SEDUTA PUBBLICA

Venerdì 18 novembre 2022 alle ore 14:30 a Firenze Cascine del Riccio via Lanciola 12/Ae per via telematica su piattaforma Zoom, Link: <https://unipd.zoom.us/j/85952797082> iniziano i lavori della Seduta Pubblica.

Sono presenti i seguenti Accademici:

*Seniores:* E. BALLETTI, M. COBOLLI, M. MAROLI, S. RAGUSA DI CHIARA, V. SBORDONI;

*Ordinari:* A. BATTISTI, R. CERVO, S. COLAZZA, A.M. FAUSTO, I. FLORIS, F. FRATI, G.S. GERMINARA, A. LUCCHI, S. MAINI, B. MASSA, R. NANNELLI, G. PELLIZZARI, F. PENNACCHIO, R. POGGI, C. RAPISARDA, P.F. ROVERSI, A. RUSSO, S. TURILLAZZI;

*Onorari:* A. M.R. GATEHOUSE;

*Straordinari:* S. BONELLI, G. BURGIO, A. CARAPELLI, M. CASARTELLI, E. CONTI, L. DAPPORTO, M.C. DIGILIO, M.L. DINDO, D.A. GRASSO, E. MAZZONI, V. PALMERI, G. SABBATINI, H. TSOLAKIS, S. VANIN, L. ZAPPALÀ.

Hanno giustificato la propria assenza gli Accademici:

*Seniores:* A. BINAZZI;

*Ordinari:* A. BALLERIO, E. DE LILLO, A. DI PALMA;

*Straordinari:* C. DUSO, R. ROMANI, S. SIMONI.

Alla Seduta Pubblica sono presenti anche numerosi ricercatori e studiosi ospiti dell'Accademia.

- Il tema della Tavola Rotonda verte su: “*Edible insects: from biology to applications*”
- Opening by the President FRANCESCO PENNACCHIO
  - *Introduction* by MORENA CASARTELLI (Università degli Studi di Milano, Italy) and GIANLUCA TETTAMANTI (Università degli Studi dell’Insubria, Italy)
  - *Progress and challenges of insects as food and feed* (ARNOLD VAN HUIS, Wageningen University, the Netherlands)
  - *Insights into the physiology of Hermetia illucens midgut* (MORENA CASARTELLI, Università degli Studi di Milano, Italy)
  - *Defense against bacterial pathogens: spotlight on the immune system of black soldier fly* (GIANLUCA TETTAMANTI, Università degli Studi dell’Insubria, Italy)
- Coffee break
- *The fate of food pathogens during black soldier fly rearing* (JEROEN DE SMET, KU Leuven, Geel Campus, Belgium)
  - *Rearing of Tenebrio molitor and its implication for human consumption* (SARA RUSCHIONI, Università Politecnica delle Marche, Italy)
  - *Waste recycling with fly larvae: from science to practice* (MORITZ GOLD, ETH Zurich, Switzerland)
  - *Insects as tools for making circular economy in applied research projects* (LARA MAISTRELLO, Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia, Italy)

Segue un’interessante discussione, coordinata dall’Accademica MORENA CASARTELLI, al termine della quale la Seduta si conclude alle ore 18.

I testi delle relazioni saranno pubblicati sugli Atti-Rendiconti 2022.

*Il Segretario verbalizzante*  
Rita CERVO

*Il Presidente*  
Francesco PENNACCHIO

## ASSEMBLEA PLENARIA

Presiede il Presidente Prof. Francesco PENNACCHIO  
Segretario verbalizzante la Segretaria Prof.ssa Rita CERVO

Sabato 19 novembre 2022 ore 9:00a Firenze \*Cascine del Riccio via Lanciola 12/ e per via telematica su piattaforma Zoom al seguente link: <https://unipd.zoom.us/j/85952797082> come da convocazione del Presidente, iniziano i lavori dell’Assemblea Plenaria.

Sono presenti gli Accademici:

*Seniores:* E. BALLETO, M. COBOLLI, R. DALLAI, S. LONGO, C. MALVA, M. MEAZZINI, S. RAGUSA DI CHIARA, G. ROTUNDO, L. SANTINI, V. SBORDONI;

*Ordinari:* A. ALMA, A. BATTISTI, M. BIONDI, M.A. BOLOGNA, P. BRANDMAYER, A. CASALE, R. CERVO, S. COLAZZA, A.M. FAUSTO, I. FLORIS, F.FRATI, G.S. GERMINARA, A. LUCCHI, S. MAINI, B. MASSA, A. MINELLI, R. NANNELLI, F. NAZZI, F. PENNACCHIO, R. POGGI, P.F. ROVERSI, A. RUSSO, S. TURILLAZZI, M. ZAPPAROLI;

*Onorari:* A. M.R. GATEHOUSE;

*Straordinari:* L. BEANI, S. BONELLI, G. BURGIO, M. CASARTELLI, E. CONTI, M. CRISTOFARO, L. DAPPOR-TO, M.C. DIGILIO, A. DI GIULIO, M.L. DINDO, A. P. GARONNA, D. GRASSO, E. MAZZONI, V. PALMERI, G. SABBATINI, G. SISCARO, H. TSOLAKIS, S. VANIN, L. ZAPPALA.

Hanno giustificato la propria assenza gli Accademici:

*Seniores*: A. BINAZZI, A. BALLERIO;

*Ordinari*: E. DE LILLO, A. DI PALMA, G. PELLIZZARI;

*Straordinari*: C. DUSO, R. ROMANI, S. SIMONI, L. TAVELLA.

Viene discusso il seguente Ordine del giorno:

1) Approvazione del verbale della Seduta precedente

- Viene esaminato il verbale della Seduta Plenaria dell'11 giugno 2021, già inviato a suo tempo per posta elettronica agli Accademici. Il verbale viene approvato all'unanimità.

2) Comunicazioni del Presidente

- Il Presidente informa gli Accademici che la prima edizione dell'assegnazione del Premio Silvestri verrà ospitata durante la seduta inaugurale del prossimo XXVII Congresso dell'ICE che si terrà in Giappone nell'agosto 2024 con un evento della durata di 45 minuti. Il Presidente dà la parola all'Accademica Onoraria ANGHARAD M.R. GATEHOUSE che conferma il lungo percorso che è stato necessario per far sponsorizzare al Council dell'ICE questo premio internazionale. Il Presidente invita gli Accademici a promuovere l'iniziativa e ricorda che il Premio Silvestri rappresenta un riconoscimento importante per l'Accademia e per la comunità scientifica.

3) Pubblicazioni dell'Accademia

- Il Presidente aggiorna l'Assemblea sullo stato di avanzamento della Piattaforma didattica di Entomologia. In particolare, informa che tutti i contributi del 1° volume sulla Sistematica e filogenesi degli artropodi, curato da gli Accademici S. MINELLI e M. BOLOGNA, sono arrivati e il volume è nella fase di impaginazione. Prende la parola l'Accademico S. MINELLI che illustra all'Assemblea il lavoro fatto e comunica la possibilità che almeno parte dell'opera venga tradotta in inglese. Il Presidente informa che il 2° volume su Morfologia, fisiologia e anatomia dovrebbe essere terminato per la fine di gennaio 2023. L'Accademico S. VANIN ha comunicato che il volume da lui curato sarà terminato entro giugno 2023.

4) XXVII Congresso Nazionale di Entomologia

- Il Presidente invita l'Accademico S. COLAZZA a fornire un aggiornamento sull'organizzazione del 27° Congresso Nazionale di Entomologia, il quale ricorda che la struttura del Convegno è ormai definita (date, comitato organizzatore e comitato scientifico, sessione, quote di partecipazione). L'Accademico S. COLAZZA illustra in modo dettagliato il programma e chiede all'Assemblea l'opportunità di aprire subito le iscrizioni; l'Assemblea invita gli organizzatori a procedere quanto prima con l'apertura delle iscrizioni.

5) Premio Osella

- Il Presidente comunica che la Commissione costituita dagli Accademici C. RAPISARDA, P. TREMATERRA e E. MAZZONI ha selezionato, tra i 10 concorrenti che avevano partecipato, E. SCHIFANI quale vincitore di questa edizione del Premio Osella. La Commissione ha inviato il verbale della Selezione al Consiglio di Presidenza; nel verbale sono illustrati i criteri adottati per la selezione ed è stato messo in evidenza come tutti i concorrenti presentassero un ottimo curriculum e fossero meritevoli.

6) consegna diplomi nuovi Accademici

- Il Presidente consegna i diplomi che sono rimasti in giacenza a causa delle assenze degli Accademici durante questo lungo periodo di pandemia. Vengono consegnati i diplomi ai seguenti Accademici Ordinari: A. LUCCHI e G. A. GERMINARA. Viene inoltre consegnato il diploma di Accademico Straordinario a P. TREMATERRA.

## 7) Fauna d'Italia

- Su richiesta del Presidente dell'ANIE, prende la parola l'Accademico Marco A. Bologna, Presidente del Comitato Scientifico per la Fauna d'Italia, relazionando sulle attività del CSFI.

Rispetto a quanto comunicato nella precedente Adunanza ANIE, non ci sono novità sulla stampa dei volumi della collana Fauna d'Italia. La casa editrice non ha ancora proceduto alla stampa del volume I sui lepidotteri « Ropaloceri » a cura del prof. Emilio Balletto e collaboratori di cui sono già state corrette le bozze da mesi. Il Comitato Scientifico, in una sua riunione recente, ha valutato la possibilità di rescissione dei rapporti editoriali. Sono tuttora in fase di preparazione i volumi sui Neuropterida, a cura del prof. Roberto A. Pantaleoni ed altri; Dermaptera, a cura del Dott. P. Fontana ed altri; Chondrichthyes, a cura del Dott. F. Serena e collaboratori; il volume II dei lepidotteri ropaloceri a cura dell'Accademico E. Balletto ed altri. In fase più preliminare di preparazione è il volume sui policheti sabellidi da parte della prof.ssa A. Giangrande.

Circa la nuova Checklist della Fauna d'Italia, sono state ricevute ulteriori versioni modificate di alcune liste precedentemente completate. Tra queste, rilevanti sono ad esempio quelle sugli Apoidea a cura di M. Comba. Queste ed altri aggiornamenti saranno inseriti nella nuova piattaforma Lifewatch, per la quale era stato indicato il gennaio 2023 per l'attuazione, ma che certamente slitterà di alcuni mesi, anche se abbiamo avuto conferma in una riunione telematica che è in corso la sua effettiva preparazione.

A seguito dell'accordo con il giornale internazionale Biogeografia (Società Italiana di Biogeografia) sono stati già stampati alcuni data-papers e altri pervengano alla rivista con regolarità.

## 8) Programma definitivo delle Sedute per l'A.A. 2023

- Il Presidente illustra il programma delle sedute per il prossimo A.A. chiedendo conferma delle seguenti Tavole Rotonde e stimolando gli Accademici di proporne di nuove in aggiunta a quelle programmate per il 2023.

Tavola Rotonda su “Chemical Ecology of insect parasitoids” coordinata dagli Accademici E. CONTI e da S. COLAZZA prevista per febbraio 2023;

Tavola Rotonda su “Entomologia medico-sanitaria” coordinata dall'Accademico C. BANDI prevista per novembre 2023;

Nessuna Tavola Rotonda verrà organizzata per giugno 2023 poiché è in programma il Congresso Nazionale di Entomologia a Palermo.

Altre proposte di organizzazione di Tavole Rotonde sono pervenute dagli Accademici P. FANCIULLI, P. TREMATERRA, G. ANFORA

Il Presidente elenca anche i titoli delle Letture che sono state proposte da alcuni Accademici:

Lettura dal titolo “Biologia, ecologia e metodi di controllo di *Drosophila suzukii*, vista anche la recente iniziativa nazionale di lotta biologica classica con *Ganaspis brasiliensis*” proposta dall'Accademico G. ANFORA.

Lettura dal titolo “Sulle conoscenze dei Lepidoptera Tortricidae della fauna italiana” proposta dall'Accademico P. TREMATERRA.

Altre proposte di letture sono pervenute dagli Accademici M. FACCOLI, G. VIGGIANI.

Il Presidente, infine, propone le date indicative per le prossime Adunanze di febbraio (17-18 febbraio) e di novembre (17-18 novembre).

## 9) Varie ed eventuali

Nessuna

La seduta dell'Assemblea Plenaria è tolta alle ore 10.00

Firenze, 19 novembre 2022

*Il Segretario verbalizzante*  
Rita CERVO

*Il Presidente*  
Francesco PENNACCHIO

## SEDUTA PUBBLICA

Presiede il Presidente Prof. Francesco PENNACCHIO  
Segretario verbalizzante: la Segretaria Prof. ssa Rita CERVO

Sabato 19 novembre 2022 alle ore 10:00, a Firenze Cascine del Riccio, via Lanciola 12/A e su piattaforma ZOOM

<https://unipd.zoom.us/j/85952797082>

come da convocazione del Presidente, iniziano i lavori della Seduta Pubblica alla presenza degli Accademici:

*Seniores:* E. BALLETO, M. COBOLLI, R. DALLAI, S. LONGO, C. MALVA, M. MEAZZINI, S. RAGUSA DI CHIARA, G. ROTUNDO, L. SANTINI, V. SBORDONI;

*Ordinari:* A. ALMA, A. BATTISTI, M. BIONDI, M.A. BOLOGNA, P. BRANDMAYER, A. CASALE, R. CERVO, S. COLAZZA, A.M. FAUSTO, I. FLORIS, F.FRATI, G.S. GERMINARA, A. LUCCHI, S. MAINI, B. MASSA, A. MINELLI, R. NANNELLI, F. NAZZI, F. PENNACCHIO, R. POGGI, P.F. ROVERSI, A. RUSSO, S. TURILLAZZI, M. ZAPPAROLI;

*Onorari:* A. M.R. GATEHOUSE.

Hanno giustificato la propria assenza gli Accademici:

*Seniores:* A. BINAZZI, A. BALLERIO;

*Ordinari:* E. DE LILLO, A. DI PALMA, G. PELLIZZARI;

Alla Seduta Pubblica sono presenti anche numerosi ricercatori e studiosi ospiti dell'Accademia.

Lettura: "Ditteri Tachinidi parassitoidi misconosciuti: biologia e interesse come insetti ausiliari" da parte dell'Accademica Maria Luisa DINDO

Commemorazione dell'Accademico Edward O. WILSON da parte degli Accademici Stefano TURILLAZZI e Donato A. GRASSO

## ASSEMBLEA ORDINARIA

Presiede il Presidente Prof. Francesco PENNACCHIO  
Segretario verbalizzante: la Segretaria Prof. ssa Rita CERVO

Sabato 19 novembre 2022 alle ore 10:30, a Firenze Cascine del Riccio, via Lanciola 12/A e su piattaforma ZOOM: <https://unipd.zoom.us/j/85952797082> come da convocazione del Presidente, iniziano i lavori dell'Assemblea Ordinaria alla presenza degli Accademici:

*Seniores:* E. BALLETO, M. COBOLLI, R. DALLAI, S. LONGO, C. MALVA, M. MEAZZINI, S. RAGUSA DI CHIARA, G. ROTUNDO, L. SANTINI, V. SBORDONI;

*Ordinari:* A. ALMA, A. BATTISTI, M. BIONDI, M.A. BOLOGNA, P. BRANDMAYER, A. CASALE, R. CERVO, S. COLAZZA, A.M. FAUSTO, I. FLORIS, F.FRATI, G.S. GERMINARA, A. LUCCHI, S. MAINI, B. MASSA, A. MINELLI, R. NANNELLI, F. NAZZI, F. PENNACCHIO, R. POGGI, P.F. ROVERSI, A. RUSSO, S. TURILLAZZI, M. ZAPPAROLI;

*Onorari:* A. M.R. GATEHOUSE

Hanno giustificato la propria assenza gli Accademici:

*Seniores:* A. BINAZZI, A. BALLERIO;

*Ordinari:* E. DE LILLO, A. DI PALMA, G. PELLIZZARI;

Viene discusso il seguente Ordine del giorno:

1) Approvazione del verbale della Seduta precedente

– Viene esaminato il verbale della Seduta Ordinaria del 11 giugno 2022, già inviato a suo tempo per posta elettronica agli Accademici. Il verbale viene approvato all'unanimità.

2) Comunicazioni del Presidente

– Nessuna comunicazione da parte del Presidente



### 3) Votazione per l'elezione di nuovi Accademici Onorari

- A norma dello Statuto (Articoli 4 e 6) e del Regolamento (Art. 6 e 7), a fronte di 7 posti disponibili per Accademico Onorario, è pervenuta entro il 30 aprile 2022 la seguente proposta per nuovo Accademico Onorario per essere votata nell'Assemblea Ordinaria di novembre 2022:

Romano DALLAI presentato dagli Accademici F. FRATI, P. ROVERSI, M. BOLOGNA

Il Presidente verificata, come disposto dall'art. 4.10 dello Statuto, la presenza della maggioranza assoluta degli Accademici Ordinari, dichiara valida l'Assemblea.

Viene portata in votazione a scrutinio segreto la candidatura dell'Accademico Romano DALLAI.

Come previsto dall'art. 4.9 l'Accademico, F. FRATI illustra all'Accademia i meriti scientifici e accademici del candidato.

Su proposta del Presidente l'Assemblea proclama per acclamazione Romano DALLAI eletto e da proporre, a norma dell'art. 4.11 dello Statuto, al Ministero dei Beni Culturali e Ambientali per la nomina ad Accademico Onorario dell'Accademia Nazionale Italiana di Entomologia da parte del Presidente della Repubblica.

### 4) Votazione per l'elezione di nuovi Accademici Ordinari

- A norma dello Statuto allora in vigore (Articoli 12 e 13) e del Regolamento (Articolo 7), a fronte di 4 posti disponibili per Accademico Ordinario, sono pervenute, entro il 30 aprile 2022, 2 proposte per nuovi Accademici Ordinari per essere votate nell'Assemblea Ordinaria di novembre 2022.

Le 2 proposte per nuovi Accademici Ordinari riguardano gli Accademici Straordinari:

- Massimo CRISTOFARO, presentato dagli Accademici A. ALMA, R. DALLAI, M. ZAPPAROLI;
- Maria Cristina DIGILIO, presentato dagli Accademici A. BATTISTI, B. GIORDANA, G. ROTUNDO

Il Presidente, verificata, come disposto dall'Articolo 4.10 dello Statuto attualmente in vigore, la presenza della maggioranza assoluta degli Accademici Ordinari effettivi, dichiara valida l'Assemblea.

Vengono designati gli Accademici Andrea Battisti e Stefano Colazza quali scrutatori per questa e per le altre votazioni previste per la presente seduta.

Votazione per l'elezione di nuovi Accademici Ordinari

- a) Viene portata in votazione a scrutinio segreto la candidatura dell'Accademico Straordinario Massimo CRISTOFARO. Come previsto dall'Articolo 4.9 dell'attuale Statuto, l'Accademico R. DALLAI illustra all'Accademia i meriti scientifici e accademici del candidato.  
Il candidato raggiunge il quorum richiesto e il Presidente proclama Massimo CRISTOFARO eletto e da proporre, a norma dell'Articolo 4.11 dello Statuto, al Ministero dei Beni e delle Attività Culturali e del Turismo per la nomina ad Accademico Ordinario dell'Accademia Nazionale Italiana di Entomologia da parte di tale Ministero.
- b) Viene portata in votazione a scrutinio segreto la candidatura dell'Accademica Straordinaria Maria Cristina DIGILIO. Come previsto dall'Articolo 4.9 dell'attuale Statuto, l'Accademico Ordinario A. BATTISTI illustra all'Accademia i meriti scientifici e accademici del candidato.  
La Candidata raggiunge il quorum richiesto e il Presidente proclama Maria Cristina DIGILIO eletto e da proporre, a norma dell'Articolo 4.11 dello Statuto, al Ministero dei Beni e delle Attività Culturali e del Turismo per la nomina ad Accademico Ordinario dell'Accademia Nazionale Italiana di Entomologia da parte di tale Ministero

### 5) Votazione per l'elezione di nuovi Accademici Straordinari

- A norma dello Statuto allora in vigore (Articoli 12 e 13) e del Regolamento (Articolo 7), a fronte di 8 posti per Accademico Straordinario, sono pervenute entro il 30 aprile 2022 le seguenti 4 proposte per nuovi Accademici Straordinari per essere votate nell'Assemblea Ordinaria di novembre 2022.
- Luca BARTOLOZZI, presentato dagli Accademici V. SBORDONI, M. BOLOGNA, R. POGGI;
- Francesca Romana DANI, presentata dagli Accademici S. TURILLAZZI, F. FRATI, I. FLORIS;

- LORENZO MARINI, presentata dagli Accademici A. BATTISTI, A. ALMA, M. BIONDI;
- EZIO PERI, presentato dagli Accademici S. COLAZZA, A. RUSSO, M. ZAPPAROLI;

Il Presidente, verificata, come disposto dall'Articolo 4.10 dell'attuale Statuto, la presenza della maggioranza assoluta degli Accademici Ordinari, dichiara valida l'Assemblea.

- a) Viene portata in votazione a scrutinio segreto la candidatura di Luca BARTOLOZZI. Come previsto dall'Articolo 4.9, dell'attuale Statuto, l'Accademico V. SBORDONI illustra all'Assemblea i meriti scientifici e accademici del candidato. Il candidato raggiunge il quorum richiesto e il Presidente proclama, come previsto dall'Articolo 4.4 del nuovo Statuto, Luca BARTOLOZZI Accademico Straordinario dell'Accademia Nazionale Italiana di Entomologia per il triennio 2022-2024.
- b) Viene portata in votazione a scrutinio segreto la candidatura di Francesca Romana DANI. Come previsto dall'Articolo 4.9, dell'attuale Statuto, l'Accademico S. TURILLAZZI illustra all'Assemblea i meriti scientifici e accademici della candidata. Il candidato raggiunge il quorum richiesto e il Presidente proclama, come previsto dall'Articolo 4.4 del nuovo Statuto, Francesca Romana DANI Accademica Straordinaria dell'Accademia Nazionale Italiana di Entomologia per il triennio 2022-2024.
- c) Viene portata in votazione a scrutinio segreto la candidatura di Lorenzo MARINI. Come previsto dall'Articolo 4.9, dell'attuale Statuto, l'Accademico A. BATTISTI illustra all'Assemblea i meriti scientifici e accademici della candidata. Il candidato raggiunge il quorum richiesto e il Presidente proclama, come previsto dall'Articolo 4.4 del nuovo Statuto, LORENZO MARINI Accademico Straordinario dell'Accademia Nazionale Italiana di Entomologia per il triennio 2022-2024.
- d) Viene portata in votazione a scrutinio segreto la candidatura di Ezio PERI. Come previsto dall'Articolo 4.9, dell'attuale Statuto, l'Accademico S. COLAZZA illustra all'Assemblea i meriti scientifici e accademici del candidato. Il candidato raggiunge il quorum richiesto e il Presidente proclama, come previsto dall'Articolo 4.4 del nuovo Statuto, EZIO PERI Accademico Straordinario dell'Accademia Nazionale Italiana di Entomologia per il triennio 2022-2024.

#### 6) Votazione per la conferma degli Accademici Straordinari in scadenza

- A norma dello Statuto (Articoli 4 e 6) e del Regolamento (Art. 6 e 7), viene sottoposta all'Assemblea la votazione per la conferma dei seguenti Accademici Straordinari in scadenza (da quinquennio secondo il precedente Statuto o da triennio secondo l'attuale Statuto dell'Accademia). Ciascuno dei sottocitati Accademici, che ha maturato il periodo di conferma, ha fatto pervenire al Consiglio di Presidenza una dichiarazione personale dell'interesse a continuare a far parte dell'Accademia, dei contributi forniti alle attività della medesima durante il periodo in cui ha ricoperto il ruolo di Accademico straordinario, nonché eventuali proposte di contributi per il futuro. Il Presidente verificata, come disposto dall'art. 4.10 dello Statuto, la presenza della maggioranza assoluta degli Accademici Ordinari, dichiara valida l'Assemblea.
- Viene portata in votazione a scrutinio segreto la conferma dell'Accademica Straordinaria Barbara CONTI. La candidata raggiunge il quorum richiesto e il Presidente lo conferma Accademico Straordinario.
- Viene portata in votazione a scrutinio segreto la conferma dell'Accademico Straordinario Andrea DI GIULIO. Il candidato raggiunge il quorum richiesto e il Presidente lo conferma Accademico Straordinario.
- Viene portata in votazione a scrutinio segreto la conferma dell'Accademica Straordinaria Maria Luisa DINDO. La candidata raggiunge il quorum richiesto e il Presidente la conferma Accademico Straordinario.
- Viene portata in votazione a scrutinio segreto la conferma dell'Accademico Straordinario Pietro Paolo FANCIULLI. Il candidato raggiunge il quorum richiesto e il Presidente lo conferma Accademico Straordinario.
- Viene portata in votazione a scrutinio segreto la conferma dell'Accademico Straordinario Emilio GUERRIERI. Il candidato raggiunge il quorum richiesto e il Presidente lo conferma Accademico Straordinario.

- Viene portata in votazione a scrutinio segreto la conferma dell'Accademico Straordinario Franco MASON. Il candidato raggiunge il quorum richiesto e il Presidente lo conferma Accademico Straordinario.
- Viene portata in votazione a scrutinio segreto la conferma dell'Accademica Straordinaria Lucia ZAPPALÀ. La candidata raggiunge il quorum richiesto e il Presidente lo conferma Accademico Straordinario.

#### 7) Votazione del Consiglio di Presidenza

- Il Consiglio di Presidenza in scadenza ha manifestato la disponibilità di candidarsi per un ulteriore mandato.

Il Presidente constatato che l'Assemblea è nelle condizioni di poter deliberare, essendo presente, come previsto dallo Statuto, la maggioranza assoluta degli Accademici Ordinari invita l'Assemblea a passare alle votazioni a scrutinio segreto.

a) Votazione per la carica di Presidente.

Su proposta del Accademico R. DALLAI l'Assemblea conferma per acclamazione l'Accademico Ordinario Francesco PENNACCHIO alla carica di Presidente

b) Votazione per la carica di Vice Presidente.

Su proposta del Accademico R. DALLAI l'Assemblea conferma per acclamazione l'Accademica Ordinaria Anna Maria FAUSTO alla carica di Vice Presidente.

c) Votazione per la carica di Segretario.

Su proposta del Accademico R. DALLAI l'Assemblea conferma per acclamazione l'Accademica Ordinaria Rita CERVO alla carica di Segretaria.

d) Votazione per la carica di Tesoriere

Su proposta del Accademico R. DALLAI l'Assemblea conferma per acclamazione l'Accademico Ordinario Roberto NANNELLI alla carica di Tesoriere.

L'Assemblea accoglie l'esito delle votazioni con un caloroso applauso.

Su proposta del Presidente, l'Assemblea conferma per acclamazione gli Accademici Ordinari Pio Federico ROVERSI e Andrea BINAZZI quali revisori dei conti effettivi e l'Accademico Ordinario Massimo MAZZINI quale revisore dei conti supplente per il prossimo triennio.

#### 8) Esame e approvazione del Bilancio preventivo a. f. 2023

Prende la parola l'Accademico Roberto NANNELLI, in qualità di Tesoriere dell'Accademia, illustrando il bilancio di previsione per l'a.f. 2023

#### 9) Varie ed eventuali

Nessuna

La seduta dell'Assemblea Ordinaria è tolta alle ore 12.00.

Firenze, 19 novembre 2022

*Il Segretario verbalizzante*  
Rita CERVO

*Il Presidente*  
Francesco PENNACCHIO



## LIFE AND WORK OF IVO HODEK – FAMOUS CZECH ENTOMOLOGIST

VLADIMÍR KOŠTÁL<sup>a</sup><sup>a</sup> *Biology Centre of the Czech Academy of Sciences, Branišovská 31, 37005 České Budějovice, Czech Republic.*

E-mail: kostal@entu.cas.cz

Commemorazione tenuta da remoto nella Seduta pubblica dell'Accademia, 11 giugno 2022.

Ivo Hodek, a member of Italian Academy of Entomology and world leading specialist on biology of ladybird beetles, died on June 11, 2021, shortly after his ninetieth birthday.

Ivo was born in 1931 and spent his youth in Prague, his beloved city. He graduated at the Faculty of Science of Charles University, Prague in 1954, and defended his PhD Thesis on ecology of seven spotted ladybird beetle, *Coccinella septempunctata*, in 1957. Since then, his passion for ladybirds accompanied him for all his life. Soon after completion of his doctoral studies, Ivo moved to Czechoslovak (later Czech) Academy of Sciences, where he spent the rest of his rich scientific career with two longer interruptions – academic stays at the University of Wageningen, Netherlands (1972-1973), and the University of F. Rabelais in Tours, France (1979-1980).



In 1985, he moved to south bohemian city of České Budějovice and helped laying there the foundations of a newly organized Institute of Entomology of the Czech Academy of Sciences. For another twenty years, Ivo led his research group of Insect Ecophysiology, which served as “incubator” where number of Czech and foreign students found ideal conditions to learn secrets of science

and began their own scientific careers. As a great paradox of life, Ivo got symptoms of allergy to insects, which finally forced him out of direct experimental work with living insects in 2005. Nevertheless, he continued writing papers, supervising students’ projects, helping and advising younger colleagues. He was still very active even in his old age over 80, as emeritus scientist, serving mainly as the editor for «European Journal of Entomology».

The first scientific paper authored by Hodek was published in *Nature* (HODEK and ČERKASOV, 1960) and, since then, Ivo produced many original works on ecology of ladybird beetles, including influential review papers (e.g. HODEK, 1965), and three famous books (HODEK, 1973; HODEK and HONĚK, 1996; HODEK *et al.*, 2012). Early in his career, Ivo branched into the study of ecophysiology of insect overwintering, initially done also on ladybirds. Ivo studied their migrations and formation of winter assemblages on volcanic hills in Central Bohemia. He also studied various aspects of their diapause and hibernation biology. Soon, however, the linden bug (*Pyrrhocoris apterus*) became his main model insect used in studies on overwintering (HODEK, 1968). Much of this work was done in close collaboration with his wife Magda, insect physiologist and endocrinologist. Their studies focused on the development of insect dormancy under natural conditions, temporal course of diapause induction, maintenance and termination, and the roles of temperature and photoperiodic sensitivity in the complex regulation of diapause development (HODEK and HODKOVÁ, 1988; HODKOVÁ and HODEK, 2004).

Hodek initiated, and personally organized, a long and successful series of symposia on the Ecology of Aphidophaga – starting in Liblice, Czech Republic, in 1965, continuing over time and across many countries, toward the 15th meeting of the series in Lleida, Spain, in 2022. He was also university teacher. His pedagogic career started abroad, in Netherlands and France, and only much later, in his late fifties, he started teaching also in the Czech Republic, first in the Charles University in Prague (since 1989), and then in the University of South Bohemia in České Budějovice (since 1995). Ivo trained and mentored many students, some of them started their own scientific careers under his supervision (Czechs Alois Honěk, Oldřich Nedvěd, and Vladimír Košťál; Bulgarian Plamen Kalushkov; Polish Piotr Ceryngier;

and Japanese Takashi Okuda). In 2020, Ivo was awarded the Purkinje honorary medal for the merit in biomedical sciences. The medal is granted by Czech Academy of Sciences and is named after the world-renowned Czech physiologist Johannes Evangelista Purkinje, who made a lot of important discoveries, including, for instance, the Purkinje cells in human brain.

Personally, I will always remember Ivo Hodek as outstanding scientist, highly inspiring supervisor, someone who shaped my early ideas on insect overwintering in diapause. I will also remember him as a wonderful human personality and as a good friend of many.

HODEK I., ČERKASOV J., 1960 – *Prevention and artificial induction of the imaginal diapause in Coccinella 7-punctata L.* – Nature, 187: 345.

HODEK I., 1967 – *Bionomics and Ecology of Predaceous Coccinellidae.* - Annual Review of Entomology, 12: 79-104.

HODEK I., 1973 – *Biology of Coccinellidae.* Springer Dodrecht, 295 pp.

HODEK I., HONĚK A. (EDS.), 1996 – *Ecology of Coccinellidae.* Springer Dodrecht, 464 pp.

HODEK I., VAN EMDEN H. F., HONĚK A. (EDS.), 2012 – *Ecology and Behaviour of the Ladybird Beetles (Coccinellidae).* Blackwell, 561 pp.

HODEK I., 1968 – *Diapause in females of Pyrrhocoris apterus L.* – Acta Entomologica Bohemoslovaca, 65: 422-435.

HODEK I., HODKOVÁ M., 1988 – *Multiple role of temperature during insect diapause – a review.* – Entomologia Experimentalis et Applicata, 49: 153-165.

HODKOVÁ M., HODEK I., 2004 – *Photoperiod, diapause and cold-hardiness.* – European Journal of Entomology, 101: 445-458.

## UN RICORDO DI EDWARD OSBORNE WILSON (1929-2021)

STEFANO TURILLAZZI<sup>a</sup> – DONATO A. GRASSO<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Dipartimento di Biologia, Università di Firenze e Insect Pharma Entomotherapy s.r.l. Via Madonna del Piano 6, Sesto Fiorentino, Firenze.

<sup>b</sup>Dipartimento di Scienze Chimiche, della Vita e della Sostenibilità Ambientale, Università di Parma, Viale delle Scienze 11/a, Parma

E-mail: stefano.turillazzi@unifi.it, donato.grasso@unipr.it

Commemorazione tenuta nella Seduta pubblica dell'Accademia, Firenze, 18 novembre 2022.

Edward Osborne Wilson (Fig. 1) è stato uno dei più influenti biologi ed entomologi dell'ultimo secolo. La sua lunga e straordinaria attività scientifica ha spaziato in numerosi campi di studio che vanno dall'entomologia, all'evoluzione del comportamento sociale, fino alle scienze sociali, l'ecologia e la biodiversità, per dedicare infine l'ultima parte del suo percorso umano e professionale a importanti progetti volti alla conservazione della natura. Data la vastità dei suoi interessi e dei suoi contributi alla scienza, questo ricordo intende dare solo una breve panoramica delle sue più importanti idee e acquisizioni rimanendo comunque principalmente nel campo dell'entomologia <sup>(1)</sup>.

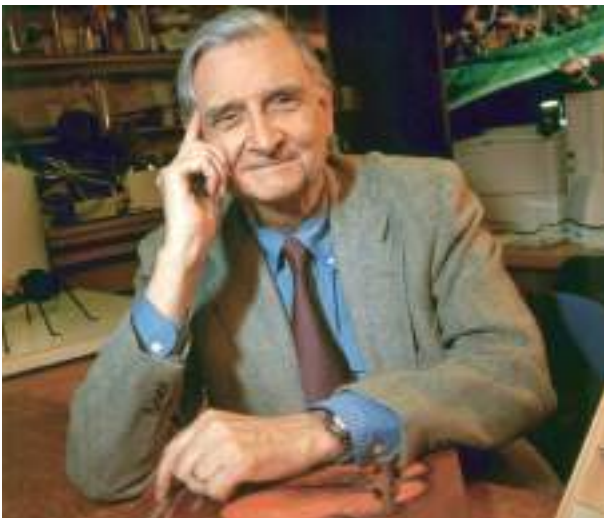


Fig. 1 - E.O. Wilson ritratto nel suo studio nel 2003 (foto Jim Harrison, Wikimedia, Creative Commons Attribution 2.5 Generic license).

### BREVI NOTE BIOGRAFICHE: L'INFANZIA, GLI STUDI, LA CARRIERA

Nasce il 10 giugno del 1929 a Birmingham (Alabama) nel profondo sud degli Stati Uniti. A Mobile, sempre

in Alabama, tra boschi, fiumi e paludi trascorre i primi anni dell'infanzia. Un'infanzia che si è dipanata in modo itinerante tra numerose località a causa dei continui spostamenti di lavoro del padre, costellata da eventi traumatici come la separazione dei genitori a sette anni, nonché da una serie di incidenti fisici. L'aver cambiato 16 scuole nel suo iter scolastico deve aver influito non poco sulle relazioni umane con i coetanei portandolo a considerare la natura come il suo «Santuario in cui rifugiarsi». I suoi interessi fin da molto piccolo spaziavano a 360 gradi con una forte preferenza per i serpenti (di cui divenne un abile “cacciatore”, gli amici lo chiamavano scherzosamente “snake” sia per questo che per la sua corporatura minuta) e gli uccelli, senza ovviamente trascurare gli insetti e le formiche in particolare. Interesse che, ben presto, diventerà preponderante anche per drammatici motivi contingenti. All'età di sette anni, a seguito di un incidente di pesca e una serie di interventi medici mal fatti perde l'uso dell'occhio destro e a ciò si aggiunge una parziale sordità. Questi malanni lo limiteranno fortemente nelle sue attività naturalistiche costringendolo a rivedere i suoi piani su quali animali avrebbe studiato. Non più uccelli o serpenti, il suo iniziale amore delle scorribande lungo il fiume: il miglior modo per dedicarsi allo studio della natura sarebbe stato concentrarsi su modelli osservabili e maneggiabili a breve distanza, anche con la visione di un solo occhio. Gli insetti, che comunque ammirava anche in precedenza, diventano la sua passione definitiva, il movente delle sue esplorazioni scientifiche.

Nel 1939 a 10 anni si trasferisce con il padre a Washington DC dove conosce Ellis McLeod, anch'egli futuro professore di entomologia. Qui ebbe ulteriori opportunità per sviluppare la sua attitudine allo studio della natura e per entrare in contatto con realtà estremamente stimolanti non presenti a Mobile: Musei, Biblioteche, Parchi naturali e il famoso National Zoo.

Dopo qualche anno, rientra a Mobile dove il suo spirito naturalistico si conclama in modo definitivo. Il suo coinvolgimento nei *Boy Scouts* (dove raggiunse il prestigioso

1 - Le fonti principali di riferimento per quanto riportato nell'articolo sono state l'autobiografia di Wilson (WILSON, 1994), la biografia autorizzata scritta da Richard RHODES (2021), l'Enciclopedia Britannica, diverse fonti ufficiali della Harvard University e della E.O. Wilson Biodiversity Foundation, oltre ai testi citati nell'articolo e riportati in Bibliografia.

grado apicale di “Aquila”) fu senz’altro cruciale per acquisire domesticità con la vita in campo nel rispetto di valori importanti di salvaguardia e solidarietà. Già a 16 anni dichiara in modo molto risoluto che sarebbe diventato un naturalista di professione. In quegli anni manifesta un particolare interesse per i ditteri *Dolichopodidae* che con la loro bellezza, varietà e comportamenti rappresentavano un modello accattivante con cui soddisfare i propri interessi. Ma il suo piano iniziale di dedicarsi a questi insetti fu ancora una volta sconvolto da una questione contingente: l’estrema difficoltà a procurarsi spilli entomologici, fondamentali per chi volesse fare raccolta di ditteri, a causa dei problemi imposti dalla Seconda guerra mondiale. Il dado era tratto, quali altri insetti erano così affascinanti, diffusi e facili da conservare con attrezzature agevolmente rinvenibili se non le formiche?

A 17 anni entra all’Università dell’Alabama distinguendosi fin dai primi giorni per entusiasmo e competenza naturalistica tanto da attirare l’attenzione di vari docenti, sia in ambito zoologico sia botanico, che ne colsero subito le enormi potenzialità. In questo ambiente familiare, accogliente e culturalmente stimolante acquisirà il Bachelor e il Master in Biologia nel 1950 lavorando sulle formiche dell’Alabama. Ma il salto di qualità non sarebbe tardato ad arrivare. Nel 1951 approda alla autorevole Harvard University dove viene subito notato dalla comunità accademica. Inizia il suo percorso di PhD sotto la guida di Frank M. Carpenter ed è tra i pochissimi a essere nominato alla Harvard Society of Fellows e a ottenere quindi il prestigioso Junior Fellowships, un finanziamento attribuito a un numero molto ristretto di giovani brillanti studiosi selezionati tra quelli di tutte le discipline. Wilson lo utilizza per coronare il sogno di esplorare mondi esotici per raccogliere e studiare formiche e altre creature. Si reca a Cuba e in Messico ed esplora vari paesi del Pacifico meridionale, tra cui Australia, Nuova Guinea, Fiji, Nuova Caledonia e Sri Lanka. È in queste spedizioni che, oltre a raccogliere campioni di notevole importanza scientifica e scoprire svariate nuove specie, comincia a sviluppare alcune idee e principi su pattern ecologici e biogeografici che si concretizzeranno in seguito nelle sue innovative teorie sulla biogeografia insulare. Nel 1955 consegue il PhD e nello stesso anno sposa quella che sarà la sua compagna per la vita, Irene (‘Renee’) Kelley con cui avrà una figlia, Catherine I. Cargill.

Nel 1956 comincia la sua carriera accademica come membro della Harvard’s Biology and Zoology Faculty (1956-1976). In seguito, sempre alla Harvard sarà Frank B. Baird Professor of Science (1976-1994), Mellon Professor of the Sciences (1990-1993), e infine Pellegrino University Professor (1994-1996). Inoltre, Wilson sarà anche curatore di entomologia presso l’Harvard Museum of Comparative Zoology (1973-1996).

Al termine della sua carriera accademica nel 1996 viene nominato Research Professor Emeritus e Honorary Curator in Entomology alla Harvard continuando a lavorare alacremente e ancora per molti anni con lo stesso entusiasmo giovanile su vari argomenti e numerosi progetti fino alla data della sua morte avvenuta il 26 dicembre del 2021.

L’opera di Wilson è indissolubilmente legata allo studio delle formiche che ha occupato l’intera sua vita. Wilson è considerato il più grande mirmecologo di tutti i tempi visto il contributo fondamentale e l’enorme produzione scientifica in questo campo. Data la vastità del suo lavoro, qui faremo solo un accenno ad alcune significative tappe nel suo percorso di mirmecologo.

Partendo dall’infanzia, un primo episodio che lo ha segnato indelebilmente è stata la lettura di un avvincente articolo divulgativo sul «National Geographic Magazine» del grande naturalista e mirmecologo americano William M. Mann, *Stalking ants, savage and civilized* (MANN, 1934). L’articolo parla in modo accattivante dei costumi di molte specie di formiche, dalle epiche scorrerie predone delle formiche legionarie sudamericane (*Eciton*) a quelle delle formiche schiaviste del genere *Polyergus*, dell’aggressività delle *bull ants* australiane del genere *Myrmecia* o delle odorose *citronella ants*; storie naturali e argomenti che ritorneranno nelle sue ricerche future.

A testimonianza della straordinaria precocità di Wilson come naturalista e ricercatore, nell’estate del 1942, a soli 13 anni, individua, descrive e segnala alle autorità cittadine, per la prima volta negli Stati Uniti, la presenza delle formiche di fuoco (*Solenopsis invicta*) in un campo nei pressi di casa sua, a Mobile. Deciderà poi di fare una sorta di censimento totale della mirmecofauna locale (lavoro che si estenderà negli anni successivi fino a coprire la fauna di tutta l’Alabama). È il primo passo per iniziare uno studio sulla presenza, invasività e loro conseguenze, di diverse specie di *Solenopsis* che diventeranno un modello per la biologia ed ecologia delle specie aliene invasive. A soli 20 anni, all’Alabama University, pubblica il suo primo articolo scientifico sull’argomento, seguito a ruota da altri approfondimenti (WILSON e EADS, 1949, 1951). Comincia a manifestarsi l’interesse per i pattern e i modelli che accompagneranno la sua intera carriera scientifica e che, come si diceva prima, rappresenterà un notevole impulso per l’approdo alla Harvard University dove avrà a disposizione i finanziamenti che gli permetteranno di visitare ed esplorare luoghi esotici ricchi di «infinite forme bellissime e meravigliose».

Nel corso della sua lunga carriera ha affrontato, spesso in modo pionieristico, lo studio dei più svariati aspetti della biologia delle formiche: morfologia-funzionale, biologia dello sviluppo, determinazione castale e fisiologia, ecologia, etologia, socialità, sistematica ed evoluzione. È forse impossibile riassumere tutte le acquisizioni scientifiche che dobbiamo al suo lavoro (per un resoconto si veda ad esempio WILSON, 2006). Tuttavia, un campo nel quale il suo lavoro è stato davvero la pietra miliare per lo sviluppo successivo di una intera branca della mirmecologia e dell’entomologia in generale è lo studio della comunicazione e del suo ruolo nei processi di organizzazione sociale. Si tratta dell’impresa che egli stesso definisce come la decifrazione della “*Ant Rosetta Stone*”. Tra la fine degli anni Cinquanta e i primi anni Sessanta, Wilson mette a punto nuovi paradigmi, nuo-



vi modelli, nuovi metodi di studio della comunicazione chimica nelle formiche che forniranno lo strumento conoscitivo e interpretativo a generazioni di entomologi e non solo. Lo studio della comunicazione di massa delle formiche di fuoco, ad esempio, con l'individuazione di alcuni processi auto-organizzativi dell'attività di foraggiamento (WILSON, 1962 a, b, c), ha aperto le porte a inimmaginabili sviluppi successivi, persino in campi al di fuori della biologia quali l'informatica e la robotica, fino alla *swarm intelligence* (si veda ad esempio BONABEAU *et al.*, 1999; DORIGO e STÜTZLE, 2004). Rimanendo in questo ambito, anche la scoperta e la descrizione di nuove ghiandole esocrine, il loro ruolo nella comunicazione e la caratterizzazione chimica dei feromoni coinvolti nei processi comunicativi hanno costituito tappe importanti nella sua ricerca (HÖLLDOBLER e WILSON, 1990). A tale proposito, è importante ricordare anche il contributo pionieristico e significativo di Mario Pavan che ha lavorato con Wilson alla decifrazione dei sistemi comunicativi di alcune specie di formiche (si veda ad esempio WILSON e PAVAN, 1959).

Tra i temi ricorrenti nella storia scientifica di Wilson mirmecologo troviamo non solo il comportamento sociale e l'ecologia ma anche la sistematica e la tassonomia a cui fin da ragazzo dedica fruttuosamente molto del suo lavoro di ricerca, e delle quali non smette mai di evidenziare l'importanza. È sua una corposa revisione del genere *Lasius* pubblicata alla fine del suo dottorato alla Harvard (WILSON, 1955). Quasi 50 anni dopo (non senza aver descritto e studiato nel frattempo molte altre specie) all'età di 74 anni si dedica alla stesura di una monumentale opera di revisione del genere *Pheidole* (WILSON, 2003a) il più corposo e diverso tra i generi di formiche. Un tomo di 818 pagine, di cui 100 di chiavi di identificazione, riportante la descrizione di 625 specie, di cui 341 nuove alla scienza, con disegni dell'autore e corredato di un innovativo (per l'epoca) CD-ROM interattivo. La dedizione e l'amore per la catalogazione delle specie viventi, base fondamentale per la loro salvaguardia, lo porta a supportare fermamente e a lavorare alla realizzazione di una *Encyclopedia of Life on-line* (WILSON 2003b).

UNO SCIENZIATO A TUTTO TONDO:  
DALL'ENTOMOLOGIA ALLA BIOGEOGRAFIA  
E BIOLOGIA DELLA CONSERVAZIONE,  
PASSANDO PER LA SOCIOBIOLOGIA

Al di là di contributi scientifici più specifici sotto forma di articoli, la sua produzione di libri e monografie anche divulgativi è stata molto corposa e varia e ha toccato temi che spaziano dalla biodiversità ed ecologia all'evoluzione del comportamento sociale, fino ad approfondire il rapporto tra uomo e natura e le diverse chiavi di interpretazione della vita e del suo significato dati dalle scienze umane e biologiche. Degli oltre 30 libri pubblicati da Wilson (tra monumentali saggi scientifici, testi divulgativi e persino un romanzo, molti tradotti anche in italiano) ne menzioneremo solo alcuni tra i più significativi. In ordine di apparizione troviamo un primo

libro, *The Theory of Island Biogeography* (MACARTHUR e WILSON, 1967), risultato di una fruttuosa collaborazione con il matematico ed ecologo Robert MacArthur e di una serie di esperimenti pionieristici condotti in natura. L'opera applica all'ambiente delle isole la teoria dell'equilibrio delle specie e dei diversi fattori che ne possono condizionare la colonizzazione (ad esempio dimensioni dell'isola, specie preesistenti, distanza dalla terra ferma o altre isole). Si tratta di una pietra miliare della moderna biogeografia ma anche della biologia della conservazione ancora oggi applicabile in molti contesti al di là della mera biogeografia insulare in senso stretto.

Lo studio della mirmecologia e l'interesse per la socialità degli insetti lo porta a scrivere *The Insect Societies* (WILSON, 1971) dove, oltre a riportare un dettagliato resoconto della biologia e storia naturale di numerosi gruppi di insetti che manifestano diversi gradi di socialità, si misura con le teorie sull'evoluzione del comportamento sociale in particolare con la *Kin Selection* (la selezione di parentela). Una sintesi estesa a tutti gli animali sociali che costituirà un vero e proprio atto di fondazione della nuova scienza da lui denominata *Sociobiology* (WILSON, 1975) che lo porterà in seguito a proiettarsi verso la visione in senso evolutivo della stessa natura umana. Il libro scatenò una serie di reazioni molto violente e critiche di determinismo estremo, giudicate persino pericolose da un punto di vista sociale. Critiche che, a dire il vero, nel tempo si sono dimostrate poco fondate, alquanto ingenua e perlopiù costruite su base ideologica, visto anche l'ampio successo e le innumerevoli evidenze scientifiche raccolte a supporto di molti dei principi sociobiologici formulati da Wilson (ALCOCK, 2003). Per nulla intimorito, anche dagli attacchi ricevuti in quegli anni, nel 1978 Wilson pubblica *On Human Nature* con cui vince il premio Pulitzer (WILSON, 1978). Lo rivincerà ancora nel 1990 con *The Ants* uno dei più completi trattati sulle formiche (HÖLLDOBLER e WILSON, 1990).

Negli anni Ottanta è uno tra i primi a utilizzare e divulgare al grande pubblico il termine "biodiversità" e l'importanza della sua salvaguardia, impegno che si concretizzerà nel bellissimo libro *The Diversity of Life* (WILSON, 1992) e in tutte le iniziative a carattere conservazionistico che porterà avanti fino alla fine dei suoi giorni. Un altro suo cavallo di battaglia è stato promuovere una fruttuosa unione tra scienze biologiche e scienze umane e sociali. Ne parla diffusamente in *Consilience: The Unit of Knowledge* (WILSON, 1998). Questa idea verrà poi sviluppata anche in vari altri contributi sull'evoluzione umana.

Wilson era una persona affabile, molto schiva e apparentemente timida ma pronta a rivedere le sue opinioni in ragione di nuovi dati ed evidenze come solo i veri grandi scienziati sanno fare. La sua parziale ritrattazione della teoria della *Inclusive Fitness*, o meglio del peso che questa avrebbe nell'evoluzione della socialità più avanzata, in un primo tempo appoggiata incondizionatamente, fece scalpore. L'idea di Wilson è quella di considerare la *Multilevel Selection* come base per spiegare l'evoluzione sociale e le forme estreme di cooperazione che si riscon-

trano nelle società più avanzate. Se ne parla diffusamente sia nel trattato *The Superorganism* (HÖLLDOBLER e WILSON, 2009) che nel libro, più a carattere divulgativo, *The Social Conquest of Earth* (WILSON, 2012). Sebbene buona parte della comunità scientifica non sia al momento d'accordo con la sua proposta, riteniamo che si tratti comunque di un contributo significativo alla discussione sulla visione multilivello dell'evoluzione sociale, in particolare di quella umana, che vale la pena di considerare, in attesa di futuri sviluppi sia teorici che sperimentali in grado di dirimere la questione.

Il suo totale impegno per la salvaguardia della natura e la conservazione della biodiversità sono ben riassunte in uno dei suoi ultimi contributi: *Half-Earth. Our Planet's Fight for Life* (WILSON, 2016). Il libro è un vero manifesto della conservazione basato su dati scientifici e indica fattivamente (grazie anche all'assiduo e meritorio lavoro della *E.O. Wilson Biodiversity Foundation* che ha promosso l'*Half Earth Project*) come fare per limitare la perdita della biodiversità sul pianeta. Solo proteggendo la metà del pianeta, o più, possiamo salvare la parte vivente dell'ambiente e raggiungere la stabilizzazione necessaria per la nostra stessa sopravvivenza.

Infine, ci preme ricordare che nel lavoro e nell'opera di Wilson non è mai mancata l'attenzione agli studenti (ne ha ovviamente avuti tantissimi, tra i quali anche alcuni che sono diventati importanti ricercatori a livello mondiale). È alle nuove generazioni di scienziati che nel 2013 dedica una bellissima raccolta di consigli sotto forma di "lettere" (*Letters to a Young Scientist*) che vale la pena di leggere, anche da parte di chi scienziato lo è già da tempo (WILSON, 2013).

#### WILSON E L'ACCADEMIA NAZIONALE ITALIANA DI ENTOMOLOGIA

L'ANIE ha sempre compreso l'enorme portata scientifica dell'opera di Wilson. Già nel 1996 lo invitò a tenere una fondamentale introduzione ai lavori del XX Congresso Internazionale di Entomologia tenutosi a Firenze proprio quell'anno (agosto 1996).

L'Accademia contattò Wilson anche in seguito per invitarlo a venire di nuovo a Firenze a tenere una lezione sulla biodiversità presso l'Aula Magna dell'Università, inviando nel 2007 l'allora vicepresidente Mario Solinas a Washington per ufficializzare l'invito. Purtroppo, questo non si è potuto concretizzare a causa di un lutto che colpì Wilson poco dopo la sua accettazione.

Qualche anno più tardi, in occasione dell'Assemblea ANIE del 19 novembre 2011, Wilson venne proclamato Accademico Onorario per gli straordinari meriti scientifici e accademici.

#### ALCUNI NOSTRI RICORDI PERSONALI

##### *Stefano Turillazzi*

Avevo conosciuto E.O. Wilson al Convegno europeo della International Union for the Study of Social Insects (IUSI) a Leuven in Belgio, era l'agosto del 1991.

Uno dei suoi libri più famosi, *The Insect Societies* (WILSON, 1971), è stato per me, giovane studente, un portale che mi ha introdotto in un mondo di infinite opportunità scientifiche, all'interno del quale altri maestri, come Leo Pardi e Mary Jean West Eberhard, hanno raffinato i miei interessi sul particolare gruppo delle vespe sociali. Il suo libro *Sociobiology* (WILSON, 1975), assieme ai lavori di William Hamilton, rappresentò l'inizio di un periodo, che dura tuttora, nel quale lo studio del comportamento sociale degli animali e dell'uomo trovava una chiara chiave interpretativa nelle teorie dell'evoluzione e della selezione naturale attirando non poche critiche da parte, soprattutto, di non biologi.

Wilson, che ebbi il piacere di accompagnare, come cicerone, in una Firenze che si preparava a celebrare, con il suo discorso inaugurale, il XX Congresso mondiale di entomologia del 1996, era un fervente ammiratore di Leo Pardi. Scienziato estremamente duttile e attento alla storia della scienza, Wilson volle in quell'occasione visitare la casa di Galileo, sulle colline di Firenze, commentando poi quella visita in una lettera di ringraziamento che mi rese orgoglioso dell'attività scientifica del mio gruppo.

Lo incontrai di nuovo al Congresso mondiale della IUSI di Washington nel 2006, dove Wilson tenne una *Plenary Lecture* in cui fece una *review* delle sue attività: dalla biogeografia insulare allo sviluppo della sociobiologia e alla biologia della conservazione; sempre passando attraverso lo studio delle sue amate formiche. Ricordo che, seduti l'uno di fronte all'altro per il pranzo, ebbi l'occasione di assicurarmi un'altra lezione memorabile sull'evoluzione della socialità. Anche da questo incontro nacque l'idea di istituire un corso specifico di sociobiologia nella allora Facoltà di Scienze Matematiche Fisiche e Naturali all'Università di Firenze, un corso che attira, ancora oggi, studenti da tutta Italia.

##### *Donato A. Grasso*

Il mio primo incontro con Wilson è avvenuto sulle pagine di quella che ritengo una delle sue opere più intime e allo stesso tempo universali, capace di trasmettere al lettore quel suo afflato, legame e inscindibile dipendenza nei confronti della natura, la sua bellezza e maestosità, quella che da questo libro in poi verrà definita *Biophilia* (WILSON, 1984), ovvero quella propensione innata che secondo Wilson tutti noi abbiamo verso il vivente. Da giovane tesista presso il laboratorio guidato dal mio mentore e maestro Francesco Le Moli della Scuola di Etologia di Parma fondata da Danilo Mainardi, ho poi divorato i due tomi de *Le Società degli Insetti* nella versione italiana, per me base fondamentale per affrontare lo studio della socialità di questi animali. Ho poi incontrato Wilson in una miriade di immaneabili articoli specialistici sui più disparati aspetti della biologia delle formiche (ispiratori di molti dei miei studi successivi) culminati in quella che, a ragione, è stata definita la bibbia della mirmecologia, *The Ants*, voluminoso trattato di oltre 700 pagine comprato con i miei primi risparmi da dottorando (HÖLLDOBLER e WILSON, 1990). Vari anni dopo, ho avuto il piacere e l'onore di tradurre per il pubblico italiano il

magnifico *Journey to the Ants* (HÖLLDOBLER e WILSON, 1995) (*Formiche. Storia di una esplorazione scientifica*, 1997, ristampa 2020, Adelphi) e molto più avanti di scrivere il saggio introduttivo e curare la revisione dell'edizione italiana de *The Superorganism* (HÖLLDOBLER e WILSON, 2009) (*Il Superorganismo*, 2011, Adelphi), entrambi scritti da Wilson assieme all'altro grande mirmeologo amico di vecchia data Bert Hölldobler. Ma forse l'incontro più accattivante con Wilson l'ho avuto grazie a un congresso, anzi grazie alla mia NON partecipazione al Congresso internazionale del 1991 a Leuven già citato prima e a cui mi iscrissi con entusiasmo proprio per incontrare finalmente il grande scienziato di persona. Quell'estate ero nel pieno delle mie ricerche di dottorato, un lavoro pionieristico in natura volto a chiarire alcuni aspetti enigmatici della biologia della formica schiavista obbligata *Polyergus rufescens*. Proprio Wilson aveva ipotizzato l'origine evolutiva di questa forma di parassitismo sociale (la dulosi) a partire da contese territoriali tra colonie limitrofe conspecifiche. Pochi giorni prima della partenza registrai per la prima volta in assoluto un raid di una colonia di *P. rufescens* ai danni di un'altra colonia conspecifica con saccheggio della prole parassita. Decisi di non partire e continuare a seguire il fenomeno. Raccolsi molti dati e registrai vari altri raid intraspecifici quella stagione e, con esperimenti *ad hoc*, dimostrai che si trattava di raid che rimpinguavano la forza lavoro schiavista nella colonia razziatrice (un vero e proprio schiavismo intraspecifico), rendendola verosimilmente più competitiva. Un buon supporto alla ipotesi dell'origine della dulosi dalla competizione territoriale formulata da Wilson (LE MOLI *et al.*, 1993; GRASSO *et al.*, 1994). Durante quell'estate, quindi, sono stato molto più vicino a Wilson di quanto non avrei fatto incontrandolo dal vivo!

Negli anni successivi, l'ammirazione per l'eleganza dei suoi studi, l'importanza delle sue scoperte e della sintesi da lui operata fin dagli anni Settanta nell'ambito dello studio del comportamento sociale mi hanno portato nel 2003 a chiedere e ottenere l'istituzione del primo corso di Sociobiologia in Italia, che da allora tengo presso l'Università di Parma.

Poi finalmente l'emozionante incontro di persona avvenuto nel 2006 a Washington in occasione del già citato Congresso internazionale IUSSI. Abbiamo parlato più volte e ho quindi potuto verificare di persona la sua proverbiale affabilità, gentilezza e umiltà.

Infine, in uno scambio epistolare di qualche anno fa, è stato un onore ricevere i suoi apprezzamenti per le nostre ricerche e scambiare con lui alcune significative riflessioni sul lavoro dello scienziato che rimarranno scolpite nella mia memoria. Tra queste, porto sempre con me la sua idea-manifesto su come fare buona scienza: «Lo scienziato ideale lavora come un contabile e pensa come un poeta».

#### CONCLUSIONI

E.O. Wilson è stato uno di quei giganti della scienza sulle cui spalle generazioni di studiosi della natura hanno

potuto attraversare mondi meravigliosi e scorgere nuovi orizzonti da raggiungere. È stata una figura monumentale in vari ambiti della biologia moderna, nonché l'iniziatore di intere nuove discipline scientifiche. Tuttavia, come ha sottolineato Piotr Naskrecki, uno dei suoi ultimi allievi e collaboratori, l'eredità di Wilson consiste non solo in una quantità monumentale di scoperte scientifiche e un'influenza senza precedenti sulla conservazione della natura ma, altrettanto importanti, i milioni di semi che ha piantato nella mente e nel cuore delle persone, i semi della passione per la vita sulla Terra e l'impegno per comprenderla e proteggerla.

La biosfera non appartiene all'uomo ma è l'uomo ad appartenerele, ha in più occasioni ribadito Wilson, sottolineando l'importanza della biofilia e del senso di appartenenza alla natura come ancora di salvezza per tutti noi.

«I will make the case that to explore and affiliate with life is a deep and complicated process in mental development [...] To an extent still undervalued in philosophy and religion, our existence depends on this propensity, our spirit is woven from it, hope rises on its currents [...] Modern biology has produced a genuinely way of looking at the world that is incidentally congenial to the inner direction of biophilia [...] The conclusion I draw is optimistic: to the degree that we come to understand other organisms, we will place a greater value on them, and on ourselves [...] Humanity is exalted not because we are so far above other living creatures, but because knowing them well elevates the very concept of life» (WILSON, 1984).

Parole quanto mai importanti proprio in questo periodo di crisi globali e di disaffezione nei confronti del pianeta che ci ospita, un manifesto rivolto non solo ai biologi ma all'intera umanità. Grazie anche di questo Prof. Wilson.

#### BIBLIOGRAFIA

- ALCOCK J., 2003 - *The Triumph of Sociobiology*. Oxford University Press, 268 pp.
- BONABEAU E., DORIGO M., THÉRAULAZ G., 1999 - *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems*. Oxford University Press, 320 pp.
- DORIGO M., STÜTZLE T., 2004 - *Ant Colony Optimization*. The MIT Press, 305 pp.
- GRASSO D.A., MORI A., D'ETTORRE P., LE MOLI F., 1994 - *Intraspecific raids and territoriality in Polyergus rufescens Latr. (Hymenoptera Formicidae)*. - Ethol. Ecol. Evol., 6: 81-87.
- HÖLLDOBLER B., WILSON E.O., 1990 - *The Ants*. Springer, 732 pp.
- HÖLLDOBLER B., WILSON E.O., 1995 - *Journey to the Ants: A Story of Scientific Exploration*. Belknap Press, 240 pp.
- HÖLLDOBLER B., WILSON E.O., 2009 - *The Superorganism*. WW Norton & Co, 544 pp.
- LE MOLI F., GRASSO D.A., D'ETTORRE P., MORI A., 1993 - *Intraspecific slavery in Polyergus rufescens Latr. (Hymenoptera, Formicidae): field and laboratory ob-*

- servations*. - *Insectes Soc.*, 40: 433-437.
- MACARTHUR R.H., WILSON E.O., 1967 - *The Theory of Island Biogeography*. Princeton University Press, 203 pp.
- MANN W.M., 1934 - *Stalking ants, savage and civilized*. - *Nat. Geo. Mag.*, 66: 171-192.
- RHODES R., 2021 - *Scientist: Edward O. Wilson: A Life in Nature*. Doubleday Books, 268 pp.
- WILSON E.O., 1951 - *Variation and Adaptation in the Imported Fire Ant*. - *Evolution*, 5: 68-79.
- WILSON E.O., 1955 - *A monographic revision of the ant genus Lasius*. - *Bulletin of the Museum of Comparative Zoology at Harvard College*, 113: 1-201.
- WILSON E.O., 1962a - *Chemical communication among workers of the fire ant Solenopsis saevissima (Fr. Smith) 1. The Organization of Mass-Foraging*. - *Anim. Behav.*, 10: 134-138.
- WILSON E.O., 1962b - *Chemical communication among workers of the fire ant Solenopsis saevissima (Fr. Smith) 2. An information analysis of the odour trail*. - *Anim. Behav.*, 10: 148-158.
- WILSON E.O., 1962c - *Chemical communication among workers of the fire ant Solenopsis saevissima (Fr. Smith) 3. The experimental induction of social responses*. - *Anim. Behav.*, 10: 159-164.
- WILSON E.O., 1971 - *The Insect Societies*. The Belknap Press, 560 pp.
- WILSON E.O., 1975 - *Sociobiology: the new synthesis*. The Belknap Press, 697 pp.
- Wilson E.O., 1978 - *On Human Nature*. Harvard University Press, 288 pp.
- WILSON E.O., 1984 - *Biophilia. The human bond with other species*. Harvard University Press, 176 pp.
- WILSON E.O., 1992 - *The Diversity of Life*. The Belknap Press, 424 pp.
- WILSON E.O., 1994 - *Naturalist*. Island Press, 416 pp.
- WILSON E.O., 1998 - *Consilience: The Unity of Knowledge*. Alfred A. Knopf, Inc., 367 pp.
- WILSON E.O., 2003a - *Pheidole in the New World: A Dominant, Hyperdiverse Ant Genus*. Harvard University Press, 818 pp.
- WILSON E.O., 2003b. *The Encyclopedia of Life*. - *Trends Ecol. Evol.*, 18: 77-80.
- WILSON E.O., 2006 - *Nature Revealed - Selected writings 1949-2006*. Johns Hopkins University Press, 719 pp.
- WILSON E.O., 2012 - *The Social Conquest of Earth*. W. W. Norton and Company, 352 pp.
- WILSON E.O., 2013 - *Letters to a Young Scientist*. Liveright, 256 pp.
- WILSON E.O., 2016 - *Half-Earth. Our Planet's Fight for Life*. Liveright / W.W. Norton, 259 pp.
- WILSON E.O., EADS J.H., 1949 - *A Report on the Imported Fire Ant Solenopsis saevissima var. richteri Forel in Alabama*. Special mimeographed report to the Director of the Alabama State Department of Conservation, 66 pp.
- WILSON E.O., PAVAN M., 1959. *Glandular sources and specificity of some chemical releasers of social behavior in dolichoderine ants*. - *Psyche*, 66: 70-76.

## IN CHE MODO L'ECOLOGIA CHIMICA PUÒ CONTRIBUIRE A MIGLIORARE IL CONTROLLO BIOLOGICO CONSERVATIVO?

STEFANO COLAZZA <sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Università degli Studi di Palermo, Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimentari e Forestali, viale delle scienze, Ed. 5, 90128, Palermo, Italia. Email: stefano.colazza@unipa.it*

Letture tenuta nella Seduta pubblica dell'Accademia. Firenze, 12 marzo 2022

### *How does chemical ecology contribute to improving conservation biological control?*

Conservation biological control (CBC) includes a variety of approaches in order to preserve and improve natural enemy efficacy through modification of the biotic environment. Among them, the approach that has been largely investigated consist in growing flowering plants (companion plants) around or within crops that provide naturally-occurring non-host food resources, such as nectar, honeydew and/or pollen. However, in order to feed on such plants, foraging parasitoids need to find suitable flowers and it is known that floral scent is used for orientation. Plants emitting highly attractive floral volatiles are thus more likely to be visited and indeed studies conducted under field conditions showed a clear correlation between parasitoid attractiveness to non-crop plants and their role in enhancing parasitoid performance. Chemical ecology investigations on the attractiveness of flowers is therefore an important aspect of parasitoid efficacy that should be taken into account in the selection of flowering plants to be used in engineering agricultural habitats

Le tematiche presentate nella lettura plenaria sono state tratte dalla pubblicazione sotto riportata:

Colazza S., Peri E., Cusumano A., 2003 - *Chemical ecology of floral resources in conservation biological control*. - Annual Review of Entomology, 68.



## FOOD WEBS IN BIOLOGICAL PEST CONTROL

LUCIA ZAPPALÀ<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Department of Agriculture, Food and Environment (Di3A), University of Catania, Via Santa Sofia, 100 - 95123 Catania, Italy. E-mail: [lucia.zappala@unict.it](mailto:lucia.zappala@unict.it)

Lettura tenuta nella Seduta pubblica dell'Accademia - Firenze, 11 giugno 2022

The interactions among the various organisms that constitute the biotic community are numerous and complex and constitute real trophic networks. The species in these food webs are rarely organized in linear food chains (plant-herbivore-predator/parasitoid), but are interconnected through direct and indirect interactions involving various organisms belonging to different trophic levels. The interactions of pests and natural enemies are normally embedded in rich communities of herbivores and variously interconnected natural enemies, with consequences on the effectiveness of biological control. Crop production in the respect of the environment and preserving natural resources, especially in the context of climate change and biological invasions, cannot ignore the role of natural enemy biodiversity with its effects on pest control. Biotic interactions inside and outside the agroecosystem are analyzed with reference to the model invasive pest *Tuta absoluta*.

KEY WORDS: trophic network; natural enemies; invasive species; biotic interaction.

### INTRODUCTION

The main challenges of modern agriculture include, among others, the achievement of an adequate production to cope with the increase in the world population and the need to reduce the environmental impact thus preserving natural resources for future generations. All this in a context of climate change and of invasive alien species whose ever-increasing trend in all categories of organisms, including insects, represents an ecological and economic challenge for the alterations they cause in the communities of organisms, as well as on the ecosystem services provided (SEEBENS *et al.*, 2017). The success in the process of invasion of new areas by exotic species is linked to the higher competitiveness of these species compared to the indigenous ones, to the favorable climatic conditions also in the newly colonized areas especially in a climate change framework, as well as to the absence of containment by natural enemies (*i.e.* Enemy Release Hypothesis) both due to a reduced number of species of natural enemies or to a more limited containment effect on the exotic species. The Enemy Release Hypothesis, consisting in the reduced containment action in newly colonized environments, constitutes the theoretical basis for classical biological control, *i.e.* the introduction of exotic entomophagous species from the areas of origin of the invasive pests (KEANE & CRAWLEY, 2002; SCHULZ *et al.*, 2019).

Biological control has therefore traditionally focused on specific natural enemies for specific pests. However, pest-natural enemy interactions are normally embedded in rich communities of herbivores and variously interconnected natural enemies with effects on the effectiveness of biological control.

### FOOD WEBS

The effects of the diversity of natural enemies on pest populations depend on the nature of the interactions among natural enemy species. This can be positive (by additive or synergistic effect), neutral (by minimal interaction or canceling the effects of positive and negative interactions) or antagonistic (by intra-guild interference, competition or disturbance) and all this with a relationship that can be linear but also not (as in the case of the asymptotic additive effect) (LETOURNEAU *et al.*, 2009).

The biodiversity of natural enemies, like that of all species, has two components: species richness and species evenness. Only natural enemy communities with high species richness and high evenness can achieve effective pest control. The most effective biocontrol can be achieved when different natural enemies occupy different and complementary ecological niches (SNYDER, 2019).

The interactions that are created between the various organisms that make up the biotic community are numerous and complex and constitute real trophic networks. The species in these food webs are rarely organized in linear food chains (plant-herbivore-predator/parasitoid) but are interconnected through direct and indirect interactions involving various organisms belonging to different trophic levels (MESSELINK *et al.*, 2012).

Consumption (in the form of herbivory, predation and parasitism) and competition are considered the two most important forms of interaction that determine the structure of communities (CHASE *et al.*, 2002). In pest and natural enemy communities, species may interact through

exploitative (or indirect) competition and induced plant defenses, competition or apparent mutualism via shared natural enemies, as well as through predation and parasitism, which include omnivory, intra-guild predation, hyperpredation or hyperparasitism (MESSELINK *et al.*, 2012; HOLT & BONSALE, 2017).

In exploitation competition or indirect competition, *i.e.* competition mediated by the resource, two pests not only compete for the same plant but also affect each other's population density by inducing plant defenses. These consist of indirect defenses such as the production of toxins, of anti-feedant substances which reduce growth and fecundity and indirect defenses such as the production of volatile substances which attract natural enemies (PAPAS *et al.*, 2017).

Numerous studies have demonstrated the indirect interactions between pests through physiological changes induced in the plant (DOMARI *et al.*, 2021; FRAGO *et al.*, 2022; MBALUTO *et al.*, 2021; ZAKIR *et al.*, 2013).

In a system composed of one predator and two prey, indirect interactions between the two pests can occur, in the form of competition or apparent mutualism. In the first case, one species negatively affects another through one common natural enemy. In apparent mutualism, one species positively influences the other through a shared natural enemy. The first is therefore positive for practical purposes while the second not because it increases the density of the pest populations (VENZON *et al.*, 2001).

This is the case for example of the positive effect, in terms of mortality percentage of *Aonidiella aurantii* (Maskell) (Hemiptera: Diaspididae) recorded in correspondence with a greater abundance of aphid predators (BOUVET *et al.*, 2019). More in details, an effective control of this citrus key pest was observed in the case of presence of coccinellid species mostly associated with aphid consumption. This observation unveils the phenomenon of apparent competition between two key citrus pests, mediated through the action of the shared generalist predators (BOUVET *et al.*, 2019).

Among the forms of interactions is included omnivory which involves the consumption of species from more than one trophic level. True omnivores are predators that feed on both the pest and the plant (ZHANG *et al.*, 2021).

Omnivorous or zoophytophagous predators have been extensively investigated not only for their direct pest containment action but also for their ability to induce direct and indirect defenses of plants (ZHANG *et al.*, 2022; BOUAGGA *et al.*, 2020; CRUZ-MIRALLES *et al.*, 2021; PÉREZ-HEDO *et al.*, 2018).

Among the interactions involving multiple natural enemies there are intraguild predation and hyperparasitization or hyperpredation. Parasitoids often engage in antagonistic interactions with higher level natural enemies by a) intraguild predation or b) hyperparasitism. The direct trophic effects involve a consumer-resource interaction, then there are also the so-called trait-mediated direct effects that involve behavioral changes between the interacting species. Finally, these interactions may be indirect if they are mediated by at least a third species.

The phytophagous has a direct effect on the characteristics of the plant and on its defenses and also an indirect effect on the parasitoids due to the effect of Herbivore Induced Volatiles (FRAGO, 2016).

In the context of interactions with higher level natural enemies, hyperparasitism or hyperpredation consist in the consumption of natural enemies by other natural enemies with whom they do not compete for shared prey, but they differ by the fact that hyperpredators can develop on alternative prey, whereas true hyperparasitoids are obligate (FRAGO, 2016).

#### THE ROLE OF BIOTIC NETWORKS IN BIOCONTROL

An important role is played by hyperparasitoids in the biological control of aphids. In particular, in the case of *Aphis spiraecola* Patch (Hemiptera: Aphididae), the use of molecular techniques has allowed us to better understand the role of parasitoids and hyperparasitoids, which otherwise is not easy to identify in the case of endoparasitoids (GOMEZ-MARCO *et al.*, 2015).

A recent example of invasive pest introduction is the Tomato borer *Tuta absoluta* (Meyrick) (Lepidoptera: Gelechiidae). Due to its economic interest as well as its importance as a biological model, several aspects of this pest and its management have been studied (BIONDI *et al.*, 2018; DESNEUX *et al.*, 2022). Particular attention to the role of the trophic chains on the containment of the phytophagous has been paid. This species is native to South America where it remained confined until 2006 when it was found for the first time in Spain; since then it has spread rapidly in almost all tomato cultivation areas, and is now present worldwide with the exception of the United States. The moth is characterized by a high reproductive potential, homodynamic development, a host range that includes both cultivated and spontaneous species; it also pupates in the soil, completes up to 13 generations/year and its adults are highly mobile. All this together with the considerable damage to the crop makes it a highly invasive species (DESNEUX *et al.*, 2022).

Upon the arrival of the pest in Italy, a survey was conducted on the complex of parasitoids that moved to live on *T. absoluta* and from this a certain richness of species emerged, mostly represented by larval ectoparasitoids (ZAPPALÀ *et al.*, 2012). This confirms that those developing on leafminers are among the richest networks of natural enemies (HAWKINS, 1994), mainly composed of generalist parasitoids (ASKEW, 1994). The same has been recorded in the entire Mediterranean basin where a bit less than 100 species have been recorded, the majority is composed of parasitoids however, the role of predators has been studied in depth (ZAPPALÀ *et al.*, 2013; FERRACINI *et al.*, 2019). Indeed, generalist predators with particular reference to mirids play an important role in the management of key pests in agriculture, also due to their ability to feed on substrates other than prey with an important role played by alternative plants.



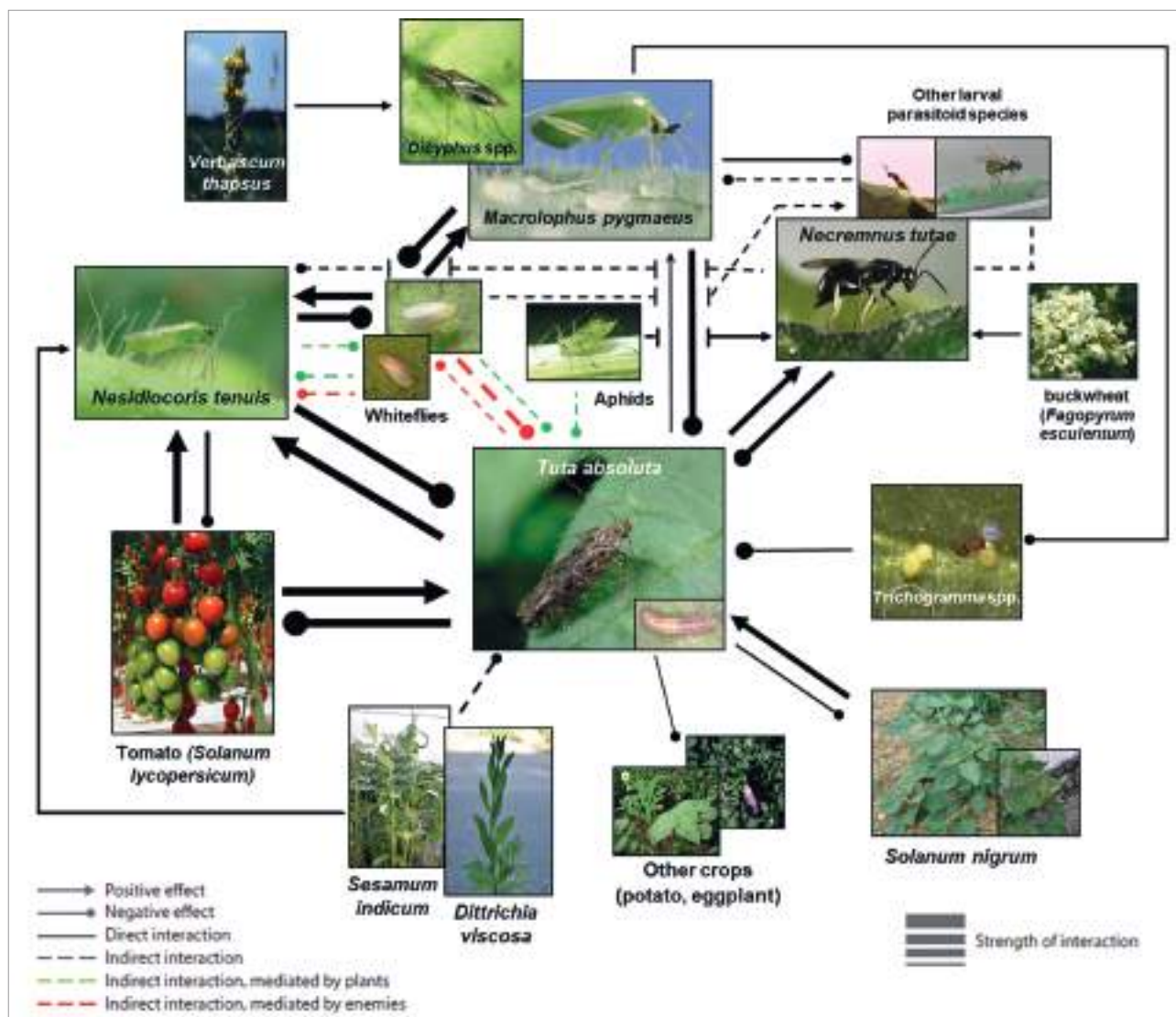


Fig. 1 - *Tuta absoluta* foodweb highlighting interactions with other components of the tomato agro-ecosystem and neighboring systems. Lines with circles correspond to negative effects in the direction of the circles, and lines with arrows show positive effects in the direction of the arrows. Solid lines represent direct interactions, and dashed lines indirect interactions (mediated by another component of the system; green and red indicate plant- and natural enemy-mediated indirect interactions, respectively). Thickness of lines and size of circles/arrowheads are proportional to the known or estimated strength of the interactions (modified from BIONDI *et al.*, 2018).

With this context in mind, even taking into account the legislation in force and only recently amended, but also considering that in the areas of origin effective natural enemies have not been identified, a classic biological control program has not been implemented, but habitat management strategies have been developed aimed at improving the contribution of indigenous species, together with augmentative releases of the parasitoid *Necremnus tutae* Ribes & Bernardo (Hymenoptera: Eulophidae) and of the predators *Macrolophus pygmaeus* (Rambur) and *Nesidiocoris tenuis* (Reuter) (Hemiptera: Miridae).

The careful observation of the system as a whole has made it possible to highlight a complex network of biological interactions both inside and outside the agro-ecosystem (Fig. 1). The knowledge of this food web has allowed important reflections having effects

also on the management of this key pest.

When observing the interactions between the predator *N. tenuis* and the larval ectoparasitoids *N. tutae* and *Bracon nigricans* Szépligeti (Hymenoptera: Braconidae), a tendency of the mirid to feed on larvae of *T. absoluta* already paralyzed by the ectoparasitoids has emerged (NASELLI *et al.*, 2017).

This opportunistic behavior can be explained by referring to the strategy of extra-oral digestion of the prey before feeding on it. In this way, by feeding on partially decomposed prey, they reduce the metabolic cost of digesting nutrients. This phenomenon, which can be explained as an evolutionary transition from herbivory to zoophagy, reduces the performance of the two ectoparasitoids. Furthermore, a predatory behavior of *N. tenuis* towards the larvae, and to a lesser extent the eggs, of *N. tutae* and *B. nigricans* has been observed. This phenom-

enon, in the broader framework of pest control, can lead to the conclusion that even if the eulophid wasp is more effective in terms of percentage of parasitization, *B. nigricans* could better coexist with the mirid (NASELLI *et al.*, 2017).

With reference to the interactions among *N. tutae* and possible other herbivores present on the crop such as the aphid *Macrosiphum euphorbiae* Thomas (Hemiptera: Aphididae), it has been proved how the presence of the honeydew produced by the aphid positively affects the parasitoid, increasing its longevity and at the same time interfering with *T. absoluta* both directly (competing for the same resource) and by inducing the defenses of the plant against the moth (CAMPOS *et al.*, 2020).

The induction of plant defenses was also observed in the interactions between the zoophytophagous mirid *N. tenuis*, the tomato plant and other key pests of the crop such as whiteflies. Indeed, numerous studies have highlighted the capacity of *N. tenuis* with its feeding punctures in all stages of development to stimulate the defenses of tomato plants and other crops against whiteflies and other pests, both direct and indirect, increasing the attractiveness to the parasitoid *Encarsia formosa* Gahan (BOUAGGA *et al.*, 2018; NASELLI *et al.*, 2016a; PÉREZ-HEDO *et al.*, 2015). This has been highlighted both in olfactometer tests and by the quantification of the phytohormones abscisic and jasmonic acid as well as the molecular markers of the related genes (NASELLI *et al.*, 2016b).

However, the trophic activity of *N. tenuis* on tomato plants represents a controversial element being it at the origin of potential damage on the crop (PÉREZ-HEDO & URBANEJA, 2016; ARNÓ *et al.*, 2010). Therefore, in this context, the possible role of alternative plants associated with the main crop was investigated.

In trials carried out with *Dittrichia viscosa* L. (Asteraceae) and *Sesamum indicum* (L.) (Pedaliaceae), the latter was found to be able to significantly reduce the damage caused by *N. tenuis* on tomato crop without affecting its predatory activity. Sesame has also proved to be the only vegetable host on which the mirid is able to complete the entire cycle without any additional prey (BIONDI *et al.*, 2016).

This attractiveness was confirmed in olfactometer trial, also highlighting the greater attraction of the mirid towards plants in the absence of prey, suggesting a prevalent herbivorous behavior of this species. The complex of volatile compounds was analyzed. Sesame was the poorest plant in volatiles while the infested tomato plants were the richest. Monoterpenes (such as  $\beta$ -phellandrene and sabinene) are the most abundant in tomatoes infested with *T. absoluta* larvae and as this treatment is also the least attractive, a repellent role of these compounds was hypothesized. Oxygenated terpenes and sesquiterpenes ( $\beta$ -caryophyllene) are the most abundant in sesame and an attractive effect is instead assumed for these compounds (NASELLI *et al.*, 2016b).

The most abundant compounds were tested at the Electroantennograph (ECG) and those that gave signifi-

cant electrophysiological responses were tested with the olfactometer for their attractiveness towards *N. tenuis*. All the compounds that had given responses at the ECG, with the exception of nonanal, were found to be significantly more attractive towards the untreated control (BIONDI *et al.*, in prep.). Beside the attractive potential of these compounds, the role of the above cited and other alternative plants in field conditions will be further investigated.

Recently a new component of the food web associated with *T. absoluta* was recorded in the western Palaearctics: the Braconid koinobiont solitary endoparasitoid endoparasitoid *Dolichogenidea gelechiidivoris*. This species, native to the Neotropics, attacks *T. absoluta* and a few other closely related species e.g. *Phthorimaea operculella*, *Keiferia lycopersicella*. It has been imported in Kenya from Peru and it has been recently fortuitously recovered in Spain and Algeria (DENIS *et al.*, 2022).

In conclusion, the knowledge of food webs can provide insights into pest dynamics and their sustainable control through direct and indirect interactions involving multiple trophic levels and biotic components evolving over time and space, inside and outside the agroecosystem.

#### ACKNOWLEDGMENTS

This work received financial support from: the EU, Programme IEV de Coopération Transfrontalière Italie-Tunisie 2014–2020 (Project INTEMAR-IS\_2.1\_073 Innovations dans la lutte intégrée contre les ravageurs et maladies récemment introduits sur cultures maraichères, Grant number E64I18002460007, The University of Catania (University Research Funds–Research Plan 2016/2018) and the Italian Ministry of Education, University and Research (MIUR) (PRIN project 2020 “BiPP”, 2020T58TA3).

#### REFERENCES

- ARNÓ J., CASTAÑÉ C., RIUDAVETS J., GABARRA R., 2010 - *Risk of damage to tomato crops by the generalist zoophytophagous predator Nesidiocoris tenuis (Reuter) (Hemiptera: Miridae)*. - Bull. Entomol. Res., 100: 105–115.
- ASKEW R.R., 1994 - *Parasitoids of leaf-mining Lepidoptera: what determines their host ranges?* In B.A. Hawkins, W. Sheehan (Eds.): *Parasitoid Community Ecology*: 177–202. Oxford University Press, New York.
- BIONDI A., GUEDES R.N.C., WAN F.-H., DESNEUX N., 2018 - *Ecology, Worldwide Spread, and Management of the Invasive South American Tomato Pinworm, Tuta absoluta: Past, Present, and Future*. - Ann. Rev. Entomol., 63 (1): 239–258.
- BIONDI A., ZAPPALÀ L., DI MAURO A., TROPEA GARZIA G., RUSSO A., DESNEUX N., SISCARO G., 2016 - *Can alternative host plant and prey affect phytophagy and biological control by the zoophytophagous mirid Nesidiocoris tenuis?*, BioControl, 61: 79–90.

- BOUAGGA S., URBANEJA A., DEPALO L., RUBIO L., PÉREZ-HEDO M., 2020 - *Zoophytophagous predator-induced defences restrict accumulation of the tomato spotted wilt virus*. - *Pest Manag. Sci.*, 76(2): 561-567.
- BOUAGGA S., URBANEJA A., RAMBLA J.L., FLORS V., GRANELL A., JAQUES J.A., PÉREZ-HEDO M., 2018 - *Zoophytophagous mirids provide pest control by inducing direct defences, antixenosis and attraction to parasitoids in sweet pepper plants*. - *Pest Manag. Sci.*, 74(6): 1286-1296.
- BOUVET J.P.R., URBANEJA A., PÉREZ-HEDO M., MONZÓ C., 2019 - *Contribution of predation to the biological control of a key herbivorous pest in citrus agroecosystems*. - *J Anim. Ecol.*, 88: 915-926.
- CAMPOS M.R., MONTICELLI L.S., BÉAREZ P., AMENS-DESNEUX E., WANG Y., LAVOIR A.-V., ZAPPALÀ L., BIONDI A., DESNEUX N., 2020 - *Impact of a shared sugar food source on biological control of Tuta absoluta by the parasitoid Necremnus tutae*. - *J. Pest Sci.*, 93 (1): 207-218.
- CHASE J.M., ABRAMS P.A., GROVER J.P., DIEHL S., CHESSON P., HOLT R.D., RICHARDS S.A., NISBET R.M., CASE T.J., 2002 - *The interaction between predation and competition: a review and synthesis*. - *Ecology Letters*, 5: 302-315.
- CRUZ-MIRALLES J., CABEDO-LÓPEZ M., GUZZO M., PÉREZ-HEDO M., FLORS V., JAQUES J.A., 2021 - *Plant defense responses triggered by phytoseiid predatory mites (Mesostigmata: Phytoseiidae) are species-specific, depend on plant genotype and may not be related to direct plant feeding*. - *Biocontrol*, 66(3): 381-394.
- DENIS C., RIUDAVETS J., ALOMAR O., AGUSTÍ N., GONZALEZ-VALERO H., CUBÍ M., MONTSERRAT M., RODRÍGUEZ D., VAN ACHTERBERG K., ARNÓ J., 2022 - *Naturalized Dolichogenidea gelechiidivoris complement the resident parasitoid complex of Tuta absoluta in north-eastern Spain*. - *J. Appl. Entomol.*, 146(4): 461-464.
- DESNEUX N., HAN P., MANSOUR R., ARNÓ J., BRÉVAULT T., CAMPOS M.R., CHAILLEUX A., GUEDES R.N.C., KARIMI J., KONAN K.A.J., LAVOIR A.-V., LUNA M.G., PÉREZ-HEDO M., URBANEJA A., VERHEGGEN F.J., ZAPPALÀ L., ABBES K., ALI A., BAYRAM Y., CANTOR F., CUTHBERTSON A.G.S., DE VIS R., ERLER F., FIRAKE D.M., HADDI, K., HAJJAR, M.J., ISMOILOV K., JAWORSKI C.C., KENIS M., LIU, H., MADADI H., MARTIN T., MAZIH A., MESSELINK G., MOHAMED S.A., NOFEMELA R.S., OKE A., RAMOS C., RICUPERO M., RODITAKIS E., SHASHANK P.R., WAN F.-., WANG M.-., WANG S., ZHANG Y., BIONDI A., 2022 - *Integrated pest management of Tuta absoluta: Practical implementations across different world regions*. - *J. Pest Sci.*, 95(1): 17-39.
- DOMARI M.A., MANSOURI S.M., MEHRPARVAR M., 2021 - *Previous herbivory modulates aphid population growth and plant defense responses in a non-model plant, Carthamus tinctorius (Asteraceae)*. - *Bull. Entomol. Res.*, 111: 715-725.
- FERRACINI C., BUENO V.H.P., DINDO M.L., INGEGNO B.L., LUNA M.G., SALAS GERVAISSIO N.G., SÁNCHEZ N.E., SISCARO G., VAN LENTEREN J.C., ZAPPALÀ L., TAVELLA L., 2019 - *Natural enemies of Tuta absoluta in the Mediterranean basin, Europe and South America*. - *Biocontrol Sci. Techn.*, 29: 578-609.
- FRAGO E., 2016 - *Interactions between parasitoids and higher order natural enemies: intraguild predation and hyperparasitoids*. - *Current Opinion in Insect Science*, 14: 81-86.
- FRAGO E., GOLS R., SCHWEIGER R., MÜLLER C., DICKE M., GODFRAY H.C.J., 2022 - *Herbivore-induced plant volatiles, not natural enemies, mediate a positive indirect interaction between insect herbivores*. - *Oecologia*, 198:443-456.
- GOMEZ-MARCO F., URBANEJA A., JAQUES J.A., RUGMAN-JONES P.F., STOUTHAMER R., TENA A. 2015. *Untangling the aphid-parasitoid food web in citrus: Can hyperparasitoids disrupt biological control?* - *Biol. Control*, 81: 111-121.
- HAWKINS B.A., 1994 - *Pattern and process in host-parasitoid interactions*. Cambridge, (UK): Cambridge University Press.
- HOLT R.D., BONSALE M.B., 2017 - *Apparent Competition*. - *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 48: 447-71.
- KEANE R.M. CRAWLEY M.J., 2002 - *Exotic plant invasions and the enemy release hypothesis*. *Trends - Ecol. Evol.*, 17: 164-170.
- LETOURNEAU D.K., JEDLICKA J.A., BOTHWELL S.G., MORENO C.R., 2009 - *Effects of Natural Enemy Biodiversity on the Suppression of Arthropod Herbivores in Terrestrial Ecosystems*. - *Annu. Rev. of Ecol., Evol. and Syst.*, 40: 573-592.
- MBALUTO C.M., VERGARA F., VAN DAM N.M., MARTÍNEZ-MEDINA A., 2021 - *Root infection by the nematode Meloidogyne incognita modulates leaf antiherbivore defenses and plant resistance to Spodoptera exigua*. - *J. Exp. Bot.*, 72 (22): 7909-7926.
- MESSELINK G.J., SABELIS M.W., JANSSEN A., 2012 - *Generalist Predators, Food Web Complexities and Biological Pest Control in Greenhouse Crops*. In M.L. Larramendy, S. Soloneski (Eds.): *Integrated Pest Management and Pest Control - Current and Future Tactics*: 191-214.
- NASELLI M., BIONDI A., TROPEA GARZIA G., DESNEUX N., RUSSO A., SISCARO G., ZAPPALÀ L., 2017 - *Insights into food webs associated with the south american tomato pinworm*. - *Pest Manag. Sci.*, 73(7): 1352-1357.
- NASELLI M., URBANEJA A., SISCARO G., JAQUES J.A., ZAPPALÀ L., FLORS V., PÉREZ-HEDO M., 2016 a - *Stage-Related Defense Response Induction in Tomato Plants by Nesidiocoris tenuis*. - *Int. J. Mol. Sci.*, 17 (8): 1210.
- NASELLI M., ZAPPALÀ L., GUGLIUZZO A., TROPEA GARZIA G., BIONDI A., RAPISARDA C., CINCOTTA F., CONDURSO C., VERZERA A., SISCARO G., 2016 b - *Olfactory response of the zoophytophagous mirid Nesidiocoris tenuis to tomato and alternative host plants*. - *Arthropod-Plant Interac.*, 11: 121-131.
- PAPPAS M.L., BROEKGAARDEN C., BROUFAS G.D., KANT M.R., MESSELINK G.J., STEPPUHN A., WÄCKERS F., VAN

- DAMH N.M., 2017 - *Induced plant defences in biological control of arthropod pests: a double-edged sword*. - *Pest Manag. Sci.*, 73: 1780–1788.
- PÉREZ-HEDO M., ARIAS-SANGUINO Á.M., URBANEJA A., 2018 - *Induced tomato plant resistance against Tetranychus urticae triggered by the phytophagy of Nesidiocoris tenuis*. - *Frontiers in Plant Science*, 9: 1419.
- PÉREZ-HEDO M., URBANEJA A., 2016 - *The Zoophytophagous Predator Nesidiocoris tenuis: A Successful But Controversial Biocontrol Agent in Tomato Crops*. In: Rami Horowitz, A. & Ishaaya, I. (Eds.), *Advances in Insect Control and Resistance Management*, (121–138). Springer International Publishing Switzerland.
- PÉREZ-HEDO M., URBANEJA-BERNAT P., JAQUES J.A., FLORS V., URBANEJA A., 2015 - *Defensive plant responses induced by Nesidiocoris tenuis (Hemiptera: Miridae) on tomato plants*. - *J. Pest Sci.* 88 (3): 543–554.
- SCHULZ A.N., LUCARDI R.D., MARSICO T.D., 2019 - *Successful Invasions and Failed Biocontrol: The Role of Antagonistic Species Interactions*. - *BioScience*, 69 (9): 711–724.
- SEEBENS H., BLACKBURN T.M., DYER E.E., GENOVESI P., HULME P.E., JESCHKE J.M., PAGAD S., PYSEK P., WINTER M., ARIANOUTSOU M., BACHER S., BLASIUS B., BRUNDU G., CAPINHA C., CELESTI-GRAPOW L., DAWSON W., DULLINGER S., FUENTES N., JAEGER H., KARTESZ J., KENIS M., KREFT H., KUEHN I., LENZNER B., LIEBHOLD A., MOSENA A., MOSER D., NISHINO M., PEARMAN D., PERGL J., RABITSCH W., ROJAS-SANDOVAL, J., ROQUES A., RORKE S., ROSSINELLI S., ROY H.E., SCALERA R., SCHINDLER S., STAJEROVA K., TOKARSKA-GUZIK B., VAN KLEUNEN M., WALKER K., WEIGELT P., YAMANAKA T., ESSL F., 2017 - *No saturation in the accumulation of alien species worldwide*. - *Nat. Commun.* 8, 14435.
- SNYDER W.E., 2019 - *Give predators a complement: Conserving natural enemy biodiversity to improve biocontrol*. - *Biol. Control*, 135: 73–82.
- VENZON M., PALLINI A., JANSSEN A., 2001 - *Interactions mediated by predators in arthropod food webs*. - *Neotrop. Entomol.*, 30(1): 1–9.
- ZAKIR A., SADEK M.M., BENGTTSSON M., HANSSON B.S., WITZGALL P., ANDERSON P., 2013 - *Herbivore-induced plant volatiles provide associational resistance against an ovipositing herbivore*. - *J. Ecol.*, 101: 410–417.
- ZAPPALÀ L., BERNARDO U., BIONDI A., COCCO A., GIORGINI M., PEDATA P., RAPISARDA C., TROPEA GARZIA G., SISCARO G., 2012 - *Recruitment of native parasitoids by the exotic pest Tuta absoluta in Southern Italy*. - *Bull. Insectol.*, 65 (1): 51–61.
- ZAPPALÀ L., BIONDI A., ALMA A., AL-JBOORY I.J., ARNÓ J., BAYRAM A., CHAILLEUX A., EL-ARNAOUTY A., GERLING D., GUENAOUY Y., SHALTIEL-HARPAZ L., SISCARO G., STAVRINIDES M., TAVELLA L., VERCHER R., URBANEJA A., DESNEUX N., 2013 - *Natural enemies of the South American moth, Tuta absoluta, in Europe, North Africa and Middle-East, and their potential use in pest control strategies*. - *J. Pest Sci.*, 86: 635–647.
- ZHANG N.X., J. ANDRINGA J., BROUWER J., ALBA J.M., KORTBEEK R.W.J., MESSELINK G.J., JANSSEN A., 2022 - *The omnivorous predator Macrolophus pygmaeus induces production of plant volatiles that attract a specialist predator*. - *J. Pest Sci.*, 95: 1343–1355.
- ZHANG N.X., STEPHAN J., BJÖRKMAN C., PUENTES A., 2021 - *Global change calls for novel plant protection: reviewing the potential of omnivorous plant-inhabiting arthropods as predators and plant defence inducers*. - *Curr. Opin. Insect. Sci.*, 47: 103–110.

## DITTERI TACHINIDI PARASSITOIDI MISCONOSCIUTI: BIOLOGIA E INTERESSE COME INSETTI AUSILIARI

MARIA LUISA DINDO\*

\* Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agro-Alimentari, Alma Mater Studiorum Università di Bologna, viale Fanin, 42, 40127 Bologna, Italia

Email [marialuisa.dindo@unibo.it](mailto:marialuisa.dindo@unibo.it)

Lettura tenuta nella Seduta pubblica dell'Accademia - Firenze, 19 novembre 2022

### *Tachinid dipterans, unacknowledged parasitoids: biology and interest as beneficial insects*

Tachinid flies are the most important group of nonhymenopteran parasitoids. Yet, their role as beneficial insects is often underestimated, especially in applied biological control. This is partially due to the relatively low number of studies dealing with their biology and potential to control target insect pests. This paper illustrates some of the biological characteristics of tachinids (i.e., host range, oviposition strategies, larval respiration, host-parasitoid interactions) and also gives examples of the use of these beneficial insects in classical and augmentative biological control, which has till now occurred mainly in the Nearctic and Neotropical regions. The purpose is to bring this group of parasitoids to light and stimulate research on their biology, host range and possibility to better exploit them in applied biological control.

KEY WORDS: Diptera Tachinidae, oviposition strategies, host-parasitoid interactions, applied biological control

### INTRODUZIONE

Quando si parla di parassitoidi, di solito si fa quasi esclusivo riferimento agli imenotteri terebranti che rappresentano indubbiamente, sia per la numerosità sia per l'azione di antagonisti nei confronti di altri insetti, il gruppo di maggiore importanza. Come conseguenza, sono serviti da modello per quasi tutte le ricerche riguardanti i fenomeni del parassitoidismo, anche coinvolgenti parassitoidi appartenenti ad altri taxa. Questi ultimi presentano similitudini, tra loro e rispetto ai terebranti, ma anche cospicue differenze riguardo alla biologia e ai rapporti con l'ospite. Tali aspetti sono spesso "misconosciuti" perché fondamentalmente oggetto di un numero relativamente scarso di ricerche.

Il più vasto e più importante gruppo di parassitoidi "non imenotteri" è rappresentato dai ditteri tachinidi di cui a oggi sono descritte circa 8600 specie (O'HARA *et al.*, 2020). Di seguito verranno illustrate alcune delle loro caratteristiche biologiche e ne verrà sottolineato l'interesse come insetti ausiliari, con l'obiettivo di stimolare ricerche che li riguardino ed evidenziarne le potenzialità come agenti di lotta biologica.

### ALCUNI ASPETTI DELLA BIOLOGIA DEI DITTERI TACHINIDI

I tachinidi sono tutti endoparassitoidi con tre stadi larvali e possono essere solitari o gregari. La maggior parte delle specie (più del 70%) di cui è noto l'ospite parassitizza larve di lepidotteri (MELLINI, 1991). In misura minore

sono parassitizzati anche ospiti appartenenti ad altri taxa (tra cui ortotteri, eterotteri e coleotteri). Un elenco delle specie ospiti note dei tachinidi italiani è riportato da CERRETTI & TSCHORSNIG (2010). Va evidenziato, comunque, che per un numero cospicuo di tachinidi (circa un terzo delle specie italiane) gli ospiti non sono noti (CERRETTI, 2010) e questo contribuisce a fare di loro dei parassitoidi misconosciuti. Invece è ben noto che i tachinidi attaccano solo stadi attivi e mobili: non uova, non pupe, anche se molti parassitoidi di lepidotteri sono larva-pupali.

Le modalità di parassitizzazione sono, in generale, di tipo diretto o indiretto. La parassitizzazione diretta può a sua volta comportare la deposizione delle uova, da parte della femmina, sul o nel corpo dell'ospite. L'ovideposizione sul corpo dell'ospite presentata, per esempio, dal parassitoide larvale di lepidotteri *Exorista larvarum* (L.), è la più diffusa nei tachinidi. Al contrario, l'ovideposizione nel corpo dell'ospite (la più comune negli imenotteri terebranti) è alquanto rara nei tachinidi, che sono sprovvisti di ovopositore perforante. Nelle specie che presentano questa modalità, come la neartica *Eucelatoria bryani* Sabrosky, l'ospite (solitamente una larva di lepidottero) viene perforato dalla femmina con un processo addominale; successivamente, la femmina stessa introduce nella ferita il proprio ovopositore membranaceo. Non mancano però casi in cui le uova vengono inserite nell'ospite attraverso aperture naturali, come quella anale o orale, come nel caso di *Rondania cucullata* Robineau-Desvoidy, parassitoide del coleottero curculionide *Conorhynchus mendicus* (Gyllenhal)

(CERRETTI *et al.*, 2010; DINDO & GRENIER, 2022).

Nei tachinidi, comunque, è piuttosto diffusa anche la parassitizzazione indiretta (rara nei terebranti), presentata da circa il 40% dei tachinidi paleartici, nonché da varie specie neartiche (MELLINI, 1991). Anche questa modalità presenta varie tipologie. Ad esempio, in alcuni tachinidi, come il neartico *Archytas marmoratus* (Townsend) (parassitoide larva-pupale di lepidotteri), le femmine, ovovivipare, ovidepongono nell'ambiente frequentato dall'ospite. Alla schiusa delle uova le larve, di tipo "planiidio", devono attendere il passaggio di un ospite, per poterlo esse stesse attaccare, penetrandone il tegumento (HUGHES, 1975). Specie antagoniste di forme endofite o ipogee, come *Lydella thompsoni* Herting, possono, invece, deporre le uova all'ingresso di gallerie scavate dagli ospiti nei fusti delle piante o nel terreno, e poi le larve del parassitoide, muovendosi nel pertugio, ricercano attivamente l'ospite, di solito una larva di lepidottero (MAINI, 1974). Infine, nella maggior parte dei goniini, come *Pseudogonia rufifrons* (Wiedemann), le uova microtipiche, minutissime (0,12-0,35 mm di lunghezza), vengono deposte dalla femmina, a embriogenesi ultimata, sul substrato trofico dell'ospite, che, nutrendosi, si autoinfesta. Le uova possono resistere a lungo nell'ambiente, mantenendosi vitali, se nessuna vittima le ingerisce (BARONIO & CAMPADELLI, 1979).

Le modalità di parassitizzazione condizionano il processo di selezione dell'ospite, di cui vari aspetti sono, al momento, poco noti per i tachinidi. Comunque nei casi di parassitizzazione diretta (sul o nel corpo dell'ospite), nei tachinidi, così come nei terebranti, le tre fasi del processo di selezione (localizzazione dell'habitat dell'ospite, localizzazione dell'ospite e sua accettabilità) sono tutte espletate dalla femmina del parassitoide. Gli stimoli che la guidano (meno studiati e quindi meno noti rispetto ai terebranti) sono in parte chimici, quali i semiochimici provenienti dalla pianta, dall'ospite o dai suoi escrementi. Tuttavia, per i tachinidi, dotati di occhi piuttosto grandi, assumono maggiore importanza, rispetto ai terebranti, gli stimoli fisici, come quelli visivi, ad esempio il colore e i movimenti dell'ospite (MELLINI, 1995; DINDO & NAKAMURA, 2018). Nei casi di parassitizzazione indiretta, quando le uova vengono deposte nell'ambiente frequentato dall'ospite, le due fasi di localizzazione e accettabilità sono espletate non dalla femmina, ma dalle larvette del parassitoide, guidate da stimoli in gran parte sconosciuti. Il movimento dell'ospite, comunque, stimola l'attacco da parte delle larvette ed è, inoltre, noto che le larve che parassitano ospiti endofiti o ipogei hanno lunghe antenne ricche di sensilli chemiorecettori olfattivi, che verosimilmente le guidano verso l'ospite. Quando le uova vengono deposte sul substrato trofico dell'ospite, le due fasi di localizzazione e accettabilità non ci sono; il contatto tra ospite e uova del parassitoide è, a quanto si sa, casuale, e la vittima si considera "accettata" nel momento in cui le uova ingerite schiudono e le larvette del parassitoide penetrano nel suo lacunoma (MELLINI, 1991).

Le femmine dei tachinidi non hanno, come quelle dei terebranti, un ovopositore morfologico perforante e quindi

non possono iniettare nell'ospite secreti in grado di condizionarlo e di sopprimerne le difese immunitarie. Le larve dei tachinidi, indipendentemente dalla modalità di parassitizzazione, devono avvalersi di altre strategie per sfuggire alla reazione emocitaria dell'ospite. In molte specie, tale reazione è sfruttata dalle larve a proprio vantaggio, per la formazione di imbuti respiratori, che sono astucci sclerificati che circondano la parte posteriore del corpo della larva, mantenendola in contatto con l'ossigeno atmosferico o tracheale. Queste strutture sono peculiari dei tachinidi e di poche altre famiglie di ditteri parassitoidi, mentre sono praticamente sconosciute negli imenotteri (MELLINI, 1995). Gli imbuti possono essere di due tipi, primari e secondari. Quelli primari vengono formati dalle larve di I età subito dopo la penetrazione nel corpo dell'ospite, a livello del tegumento, e consentono alle larve stesse (metapneustiche) di respirare ossigeno atmosferico fin dall'inizio del loro sviluppo, e quindi di accrescersi rapidamente uccidendo l'ospite in tempi piuttosto rapidi. Gli imbuti secondari vengono, invece, indotti da larve in I età avanzata o in II età iniziale, a livello del tegumento dell'ospite o di una sua trachea. In tal caso, le giovani larve esibiscono altri meccanismi che consentono loro di sfuggire, nelle fasi iniziali, la reazione emocitaria. Ad esempio, in *P. rufifrons*, parassitoide larva-pupale obbligato di lepidotteri, a uova microtipiche, le larve in I età penetrano in un muscolo addominale dell'ospite, dove respirano per via tegumentale e rimangono fino a quando l'ospite stesso si appresta a incrisalidarsi; a quel punto, stimulate dagli ecdisteroidi della vittima, le larve mutano in II età (BARONIO & SEHNAL, 1980), abbandonano il muscolo e si portano nello spazio, colmo di liquido esuviale, che si forma, durante l'apolisi dell'ospite, tra epidermide e vecchia cuticola larvale. La maggior parte delle larvette viene eliminata con l'ecdisi dell'ospite ma una, di solito, riesce a penetrare sotto le teche alari della crisalide neoformata, inducendo la formazione di un imbutto tegumentale secondario, dovuto, in questo caso, non a una reazione emocitaria, ma a uno scollamento delle teche (BARONIO & CAMPADELLI, 1979). Come si può notare, le casistiche sono varie e non sempre riconducibili a uno schema comune.

Un altro aspetto della biologia dei tachinidi e dei loro rapporti con l'ospite riguarda la dicotomia coinobionte/idiobionte, descritta facendo riferimento ai terebranti ed estesa, non sempre in modo adeguato, ai parassitoidi appartenenti ad altri taxa. Ricordo che i coinobionti sono parassitoidi a fase parassitaria prolungata le cui femmine non uccidono l'ospite né lo paralizzano e consentono, quindi, all'ospite stesso di continuare a nutrirsi e a svilupparsi oltre lo stadio che ha subito la parassitizzazione (HAESELBARTH, 1979). Tipici coinobionti sono i terebranti endolarvali le cui relazioni fisiologiche con l'ospite sono particolarmente complesse (PENNACCHIO & STRAND, 2006). Al contrario, gli idiobionti presentano fase parassitaria breve, paralizzano o uccidono la vittima in tempi rapidi e si comportano per la maggior parte della loro vita da zoosaprofagi e zoonecrofagi. Tipici idiobionti sono i terebranti oofagi o pupali.

Per quanto riguarda i tachinidi, essi vengono comu-

nemente considerati tutti come coinobionti (STIREMAN *et al.*, 2006). Effettivamente alcune specie, come *P. rufifrons*, presentano un elevato grado di integrazione con la fisiologia dell'ospite, una fase parassitaria lunga e uno sviluppo dipendente dal bilancio ormonale della vittima (BARONIO & SEHNAL, 1980). Altri tachinidi invece presentano un basso grado di integrazione e si sviluppano in modo continuo, indipendentemente dal bilancio ormonale dell'ospite. Alcuni, come *E. larvarum*, crescono molto rapidamente perché formano imbuti respiratori tegumentali primari e respirano, quindi, ossigeno atmosferico fin dall'inizio del loro sviluppo. Questi parassitoidi presentano una fase parassitaria particolarmente breve, uccidendo l'ospite in tempi rapidi. Pertanto, risulta inappropriato definirli come coinobionti, perché hanno caratteristiche che li associano maggiormente agli idiobionti, rispetto ai quali, tuttavia, si differenziano, perché, comunque, consentono all'ospite di continuare ad accrescersi, sia pure in modo molto limitato, dopo la parassitizzazione. Per questo, piuttosto che fare riferimento alla dicotomia, è preferibile suddividere i tachinidi in base al loro grado di integrazione con la fisiologia della vittima e, in particolare, in base alla dipendenza o indipendenza del loro sviluppo dal bilancio ormonale dell'ospite (DINDO, 2011).

#### INTERESSE DEI TACHINIDI COME INSETTI AUSILIARI

I tachinidi rivestono un ruolo di grande rilievo come insetti ausiliari, ma, anche da tale punto di vista, questi parassitoidi sono stati di gran lunga meno studiati rispetto agli imenotteri terebranti. Essi sono, tuttavia, importanti antagonisti di insetti fitofagi e svolgono anche una funzione, che meriterebbe di essere approfondita, come insetti impollinatori (AL-DOBAI *et al.*, 2012).

Il ruolo dei tachinidi come antagonisti di insetti fitofagi è riconosciuto in lotta biologica conservativa (CAMERINI *et al.*, 2016; VARGAS *et al.*, 2022), ma è

misconosciuto e sottostimato in lotta biologica applicata (classica e, soprattutto, aumentativa). Le potenzialità dei tachinidi in lotta biologica applicata rimangono dunque in gran parte da indagare e, laddove possibile, da valorizzare. In tale ambito i tachinidi sono stati utilizzati prevalentemente nelle regioni neartica e neotropica, soprattutto in lotta biologica classica, mentre un minore numero di specie è stato impiegato in lotta biologica aumentativa. Pochissimi sono gli esempi riferiti alla regione paleartica. Per quanto riguarda, nello specifico, l'Europa, mi è noto un solo caso di lotta biologica classica, effettuata nel 1967, importando dal nord America alla Polonia *Myiopharus doriphorae* (Riley), un antagonista di *Leptinotarsa decemlineata* (Say), con successo limitato. Il parassitoide, infatti, si è naturalizzato, ma non ne è nota l'azione che svolge verso l'insetto target (GERBER & SCHAFFNER, 2016).

Nella tabella 1 sono illustrati esempi di tachinidi impiegati in lotta biologica classica nelle regioni neartica e neotropica. Si può segnalare, tra gli altri, *Cyzenis albicans* (Fallen), un goniino che presenta parassitizzazione indiretta a uova microtipiche, larva-pupale e oligofago, introdotto dall'Europa e naturalizzato in Canada dove ha contribuito, per diversi anni, a contrastare il lepidottero *Operophtera brumata* (L.) (HORGAN *et al.*, 1999). Nella tabella, sono, inoltre, riportate tre tra le 16 specie di tachinidi introdotte dall'Europa nel nord degli Stati Uniti per contrastare il lepidottero *Lymantria dispar* (L.). Le tre specie si sono naturalizzate e sono, in seguito, state impiegate anche in lanci aumentativi (SABROSKY & REARDON, 1976; BLUMENTHAL *et al.*, 1979). Tuttavia, due di loro, *Exorista larvarum* (L.) e *Compsilura concinnata* (Meigen), entrambe a parassitizzazione diretta, sono altamente polifaghe e attaccano, oltre a *L. dispar*, numerose altre specie di lepidotteri. In particolare, *C. concinnata* (di cui gli ospiti noti sono oltre 200) è sospettata di essere una delle cause che possono

Tab. 1 - Esempi di tachinidi impiegati in lotta biologica classica nelle regioni neartica e neotropica

Specie	Insetto target	Areale di introduzione	Fonte bibliografica
<i>Cyzenis albicans</i> (Fallen)	<i>Operophtera brumata</i> (L.)	Canada	HORGAN <i>et al.</i> , 1999
<i>Exorista larvarum</i> (L.) <i>Compsilura concinnata</i> (Meigen) <i>Blepharipa pratensis</i> (Meigen)	<i>Lymantria dispar</i> (L.)	Nord degli USA	SABROSKY & REARDON, 1976 BLUMENTHAL <i>et al.</i> , 1979
<i>Lixophaga diatraeae</i> (Townsend)	<i>Diatraea saccharalis</i> (F.) e altri lepidotteri nocivi alla canna da zucchero	Sud degli USA, America meridionale	GRENIER, 1988 VAN LENTEREN <i>et al.</i> , 2020
<i>Lydella minense</i> (Townsend) <i>Billaea claripalpis</i> (van der Wulp)	<i>Diatraea</i> spp.	Brasile, Colombia, Ecuador, Perù	GRENIER, 1988 VAN LENTEREN <i>et al.</i> , 2020
<i>Lydella thompsoni</i> Herting	<i>Ostrinia nubilalis</i> (Hübner)	USA	THOMPSON & PARKER, 1928 MASON <i>et al.</i> , 1991
<i>Lixadmontia franki</i> Wood & Cave	<i>Metamasius callizona</i> (Chevrolat)	USA (Florida)	COOPER <i>et al.</i> , 2011

indurre il declino di lepidotteri indigeni in Nord America, tra cui la farfalla monarca *Danaus plexippus* (L.) (OBERHAUSER *et al.*, 2017). Esempi come questo non devono, tuttavia, scoraggiare la lotta biologica classica (sia con tachinidi, sia con terebranti), ma, piuttosto, stimolare le ricerche riguardanti la biologia e il possibile impatto che un parassitoide esotico potrebbe avere sull'ambiente e, in particolare, sull'entomofauna locale. Va detto che, attualmente, c'è molta più sensibilità e attenzione verso questi aspetti rispetto a qualche decennio fa, tanto che parassitoidi polifagi come *C. concinnata* e *E. larvarum* oggi verrebbero difficilmente considerati in programmi di lotta biologica classica contro *L. dispar*, mentre ci si orienterebbe, per le introduzioni, sulle sole specie oligofaghe come *Blepharipa pratensis* (Meigen).

Per quanto riguarda la lotta biologica aumentativa, le applicazioni sono state, e sono, quasi esclusivamente effettuate per il controllo di *Diatraea saccharalis* (F.) e altri lepidotteri endofiti dannosi alla canna da zucchero in America Centro-Meridionale. A Cuba, nell'ambito del programma nazionale di lotta biologica contro questi lepidotteri, il tachinide nativo *Lixophaga diatraeae* Townsend viene tuttora allevato massalmente in biofabbriche di stato e impiegato su vasta scala per la lotta (PÉREZ-CONSUEGRA *et al.*, 2018). Nei primi anni Duemila venivano prodotti annualmente circa 100 milioni di adulti, che venivano distribuiti su 1,6 milioni di ettari (MEDINA, 2002). Molto limitata è invece la produzione di tachinidi in biofabbriche a scopo commerciale. A titolo di esempio, due specie, *Lydella minense* e *Billaea claripalpis*, utilizzate per il controllo di *Diatraea* spp., sono prodotte a scopo commerciale in Colombia e Perù (DINDO & GRENIER, 2022).

Varie possono essere le ragioni dello scarso impiego dei tachinidi in lotta biologica applicata (soprattutto aumentativa). Una delle ragioni principali è rappresentata dal numero di ricerche, di gran lunga inferiore per i tachinidi rispetto ai terebranti: ciò comporta, necessariamente, una conoscenza più limitata della loro biologia, dei loro rapporti con l'ospite e delle loro potenzialità (ed è anche alla base delle conseguenze indesiderate che si sono riscontrate a seguito dell'utilizzo di specie polifaghe come *C. concinnata* in lotta biologica classica). Inoltre, per quanto riguarda l'allevamento su vasta scala (indispensabile per la messa a punto di programmi di lotta biologica applicata) i tachinidi hanno maggiori esigenze rispetto ai terebranti, in particolare in termini di cibo e spazio. Modalità di allevamento inappropriate sono state spesso alla base di tentativi non riusciti di applicazioni di lotta biologica di questi parassitoidi (DINDO & GRENIER, 2022).

#### CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

In conclusione, le potenzialità dei tachinidi in lotta biologica applicata meritano di essere maggiormente approfondite. Sono pertanto necessarie maggiori ricerche sulla biologia di questi parassitoidi e sulle loro interazioni con l'ospite (in particolare, per quanto riguarda i meccanismi di selezione dell'ospite stesso). Uno degli obiettivi

può essere, inoltre, quello di incrementare o incoraggiare l'uso di specie che hanno già dimostrato di avere buone potenzialità come agenti di lotta biologica, in particolare come parassitoidi di forme endofite: un esempio per l'Italia può essere rappresentato da *Lydella thompsoni* Herting, antagonista di *Ostrinia nubilalis* Hübner (CAMERINI *et al.*, 2016). È inoltre auspicabile individuare nuove specie impiegate in lotta biologica mediante la ricerca di nuove associazioni ospite-parassitoide (non va dimenticato che, per molti tachinidi, gli ospiti non sono attualmente noti). Sia ai fini della ricerca sia delle applicazioni in lotta biologica, sono infine fondamentali la messa a punto e il continuo miglioramento delle tecniche di allevamento di questi insetti ausiliari; anche questo aspetto è strettamente correlato con lo studio della loro biologia.

#### BIBLIOGRAFIA

- AL-DOBAI S., REITZ S., SIVINSKI J., 2012 - *Tachinidae (Diptera) associated with flowering plants: estimating floral attractiveness*. - Biol. Control, 61: 230–239
- BARONIO P., CAMPADELLI G., 1979 - *Ciclo biologico di Gonia cinerascens Rond. (Dipt. Tachinidae) allevata in ambiente condizionato sull'ospite di sostituzione Galleria mellonella L. (Lep., Galleriidae)*. - Boll. Ist. Ent. Univ. Bologna, 34: 35-54.
- BARONIO P., SEHNAL F., 1980 - *Dependence of the parasitoid Gonia cinerascens on the hormones of its lepidopterous hosts*. - J. Insect Physiol., 26: 619-626.
- BLUMENTHAL E.M., FUSCO R.A., REARDON R.C., 1979 - *Augmentative release of two established parasite species to suppress populations of the gypsy moth*. - J. Econ. Entomol., 72: 281-288.
- CAMERINI G., GROPPALI R., TSCHORSNIG H.P., MAINI S., 2016 - *Influence of Ostrinia nubilalis larval density and location in the maize plant on the tachinid fly Lydella thompsoni*. Bull. Insectol., 69: 301-306.
- CERRETTI P., 2010 - *I tachinidi della fauna italiana (Diptera Tachinidae), con chiave interattiva dei generi ovest-paleartici. Volume I, Volume II + CD-ROM*. - Cierre Edizioni, Verona, pp. 573 + 239.
- CERRETTI P., DINDO M.L., MEI M., 2010 - *Biologia, ecologia ed etologia*. In: Cerretti P., I Tachinidi della fauna italiana (Diptera Tachinidae) con chiave interattiva dei generi ovest paleartici. Vol I., Cierre Edizioni, Verona, pp 17–44
- CERRETTI P., TSCHORSNIG H.P., 2010 - *Annotated host catalogue for the Tachinidae (Diptera) of Italy*. - Stutt. Beit. Natur., 3: 305-40.
- COOPER T.M., FRANK J.H., CAVE R.D., BURTON M.S., DAWSON J.S., SMITH B.W., 2011 - *Release and monitoring of a potential biocontrol agent, Lixadmontia franki, to control an invasive bromeliad-eating weevil, Metamasius callizona in Florida*. - Biol. Control., 59: 319-325.
- DINDO M.L., 2011 - *Tachinid parasitoids: are they to be considered as koinobionts?* - Biocontrol, 56: 249-255.



- DINDO M.L., NAKAMURA, S. 2018 - *Oviposition strategies of tachinid parasitoids: two Exorista species as case studies*. -Int. J. Insect Sci., 10:1-6.
- DINDO M.L., GRENIER P., 2022 – *Production of dipteran parasitoids*. - In: Mass Production of Beneficial Organisms - Invertebrates and Entomopathogens, 2<sup>nd</sup> Edition. Morales-Ramos J., Rojas M.G., Shapiro-Ilan D. Eds., Academic Press, New York, USA, pp. 71-100.
- GERBER E., SCHAFFNER U., 2016 - *Exotic insect biocontrol agents released in Europe*. - In: Review of invertebrate biological control agents introduced into Europe. Gerber E., Schaffner U. Eds., CABI Publishing, Oxon, UK, pp. 9-117.
- GRENIER S., 1988 - *Applied biological control with tachinid flies (Diptera, Tachinidae): a review*. - Anz. Schadl. Pflanz. Umwelt., 61: 49-56.
- HAESSELBARTH E., 1979 - *Zur Parasitierung der Puppen von Forleule (Panolis flammea [Schiff.]), Kiefernspanner (Bupalus piniarius [L.]) und Heidelbeerspanner (Boarmia bistortana [Goeze]) in bayerischen Kiefernwäldern*. – Zeitschr. Angew. Ent., 87:186–202.
- HORGAN F.G., MYERS J.H., VAN MEEL R., 1999 - *Cyzenis albicans (Diptera: Tachinidae) does not prevent the outbreak of winter moth (Lepidoptera: Geometridae) in birch stands and blueberry plots on the lower mainland of British Columbia*. - Environ. Entomol., 28: 96-107
- HUGHES P.S., 1975 – *The biology of Archytas marmoratus (Townsend)*. – Ann. Entomol. Soc. Am., 68: 759-767.
- MAINI, S., 1974 - *Ulteriori indagini sui parassiti di Ostrinia nubilalis (Hb.) (Lepidoptera Pyralidae) in provincia di Bologna*. - Boll. Ist. Ent. Univ. Bologna, 32: 133-151.
- MASON C. E., JONES R.L., THOMPSON M.M., 1991 - *Rearing Lydella thompsoni (Diptera: Tachinidae), a parasite of the European corn borer (Lepidoptera: Pyralidae)*. – Ann. Entomol. Soc. Am., 84: 179–181,
- MEDINA H., 2002 - *Resultados del programa nacional de lucha biológica del MINAZ en sus 20 años de trabajo*. - Rev. Protección Veg., 17: 187.
- MELLINI E., 1991 - *Sinossi di biologia dei Ditteri Larvivoridi*. - Boll. Ist. Ent. “G. Grandi” Univ Bologna, 45: 1-38.
- MELLINI E., 1995 - *Elementi per un confronto tra il parassitoidismo dei Ditteri e quello degli Imenotteri*. - Boll. Ist. Ent. “G. Grandi” Univ Bologna, 49: 41-100.
- OBERHAUSER K., ELMQUIST D., PERILLA-LOPEZ J.M., GEBHARD I., LUKENS L., STIREMAN J., 2017 - *Tachinid fly (Diptera: Tachinidae) parasitoids of Danaus plexippus (Lepidoptera: Nymphalidae)*. - Ann. Entomol. Soc. Am., 110: 536-543.
- O’HARA J., HENDERSON S.J., WOOD D.M., 2020 - *Preliminary checklist of the Tachinidae of the world. Version 2.1*. -Disponibile a: <http://www.nadsdiptera.org/Tach/WorldTachs/Checklist/Worldchecklist.html> (data accesso: 10/1/2023), Documento PDF, 1039 pp.
- PENNACCHIO F., STRAND M., 2006 - *Evolution of developmental strategies in parasitic Hymenoptera*. – Annu. Rev. Entomol., 51: 233–258.
- PÉREZ-CONSUEGRA N., MIRABAL L., JIMÉNEZ L.C., 2018 - *The role of biological control in the sustainability of the Cuban agri-food system*. -Elem. Sci. Anth., 6: 79: 1-15.
- SABROSKY C.W., REARDON, R.C., 1976 - *Tachinid parasites of the gypsy moth, Lymantria dispar, with keys to adults and puparia*. - Misc. Publ. Entomol. Soc. Am. 10: 1-126
- STIREMAN J.O., O’HARA J.E., WOOD D.M., 2006 - *Tachinidae: evolution, behavior, and ecology*. - Annu. Rev. Entomol., 51: 525–55.
- THOMPSON W.R., PARKER H.R., 1928 – *The European corn borer and its controlling factors in Europe*. - USDA Tech. Bull., 59: 1-63.
- VAN LENTEREN J.C, BUENO V.H.P., LUNA M.G., COLMENAREZ Y.C., 2020 - *Biological control in Latin America and the Caribbean: its rich history and bright future*. – CABI Publishing, Wallingford, UK, 550 pp.
- VARGAS G., RIVERA-PEDROZA L.F., GARCÍA L.F. JAHNKE S.M., 2022 - *Conservation biological control as an important tool in the neotropical region*. - Neotrop Entomol., <https://doi.org/10.1007/s13744-022-01005-1>, 18 pp.



SEDUTA PUBBLICA, FIRENZE, 11 MARZO 2022

Tavola Rotonda su:

CONSERVAZIONE E MONITORAGGIO DEGLI INSETTI SAPROXILICI

Coordinatori:

ALESSANDRO CAMPANARO e

FRANCO MASON *Accademico*



## CONSERVAZIONE E MONITORAGGIO DEGLI INSETTI SAPROXILICI

ALESSANDRO CAMPANARO <sup>a</sup> - FRANCO MASON <sup>b</sup> - MARCO BARDIANI <sup>c</sup>  
SÖNKE HARDERSEN <sup>c</sup> - FRANCESCO PARISI <sup>d</sup> - PIO FEDERICO ROVERSI <sup>e</sup>

<sup>a</sup> CREA Centro di ricerca Difesa e Certificazione, Via Lanciola 12/A, 50125 – Firenze.

<sup>b</sup> Già Responsabile del Centro Nazionale Carabinieri Biodiversità “Bosco Fontana”, Via Carlo Ederle 16/A, 37126 – Verona.

<sup>c</sup> Reparto Carabinieri Biodiversità di Verona – Centro Nazionale Carabinieri Biodiversità “Bosco Fontana”, Strada Mantova 29, 46045 – Marmirolo (MN).

<sup>d</sup> GeoLAB - Laboratorio di Geomatica Forestale, Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agrarie, Alimentari, Ambientali e Forestali (DAGRI), Università degli Studi di Firenze, Via San Bonaventura 13, 50145 – Firenze.

<sup>e</sup> CREA-DC, Istituto Nazionale di Riferimento per la Protezione delle Piante, Via Lanciola 12/A, 50125 – Firenze.

\* Corresponding Author: [alessandro.campanaro@crea.gov.it](mailto:alessandro.campanaro@crea.gov.it)

### Round table on “Conservation and monitoring of Saproxylic Insects”

*The saproxylic insects are a fundamental component of the forest ecosystem. Nevertheless their knowledge and the need for their conservation is still not really understood and applied at management level in the majority of European forests. The round table aims to illustrate definitions, scientific evolution, and monitoring techniques of this functional group.*

KEY WORDS: forest conservation, saproxylic insects, monitoring.

L'Accademia Nazionale Italiana di Entomologia ha recentemente promosso una tavola rotonda sul tema “Conservazione e monitoraggio degli Insetti saproxilici”. L'evento, tenutosi in presenza l'11 marzo scorso, è stato ospitato nell'Auditorium “R. Zocchi” del CREA, Centro di ricerca Difesa e certificazione a Firenze. Il tema della conservazione della biodiversità degli insetti saproxilici è focalizzato dal Rapporto del Consiglio d'Europa (1989) stilato dal noto sirfidologo irlandese Martin C.D. Speight che fornisce anche la moderna e più citata definizione del termine “saproxilici”: “*specie di invertebrati che dipendono, durante una parte del loro ciclo di vita, dal legno morto o morente di alberi morti – in piedi o a terra – o dai funghi del legno, o dalla presenza di altri organismi saproxilici*”. La tematica dei saproxilici è quindi di evidente interesse per la conservazione biologica di vari gruppi tassonomici e in particolare degli insetti: si stima infatti che circa il 30% specie di un ecosistema forestale siano “saproxiliche”. Nella gestione di una foresta, anche commerciale, è dunque essenziale la conservazione del cosiddetto compartimento del “legno morto” e in particolare degli alberi senescenti o veterani, portatori di una grande varietà di “microhabitat”: dalle cavità dendrotelmiche alla linfa sgorgante dal tronco così importante, ad esempio, per il cervo volante e per rarissime specie di ditteri sirfidi. La Raccomandazione R (88)10 del Consiglio d'Europa ha mutuato il rapporto di Speight, invitando gli Stati membri a darne applicazione. Ad oggi tuttavia, nel (purtroppo) frammentato e caotico panorama gestionale forestale italiano, la citata Raccomandazione è ancora praticamente lettera

morta. Di qui la necessità di sensibilizzare il pubblico su una tematica negletta dalla generalità dei gestori forestali, ma di assoluta attualità soprattutto in un momento storico come quello attuale, in cui fortissima è la tendenza al ritorno dello sfruttamento “*tout court*” della foresta per la produzione di biomassa da energia, con buona pace della conservazione della biodiversità. Di seguito si dà conto, in forma riassuntiva, delle relazioni tenute dai diversi specialisti in occasione della tavola rotonda fiorentina.

### GLI INSETTI SAPROXILICI NELLA STORIA DELLE SCIENZE DELLA NATURA

Volendo affiancare, pur in modo stringato, alla storia umana quella che è stata la raffigurazione e la trattazione degli artropodi che oggi raggruppiamo nella categoria degli insetti saproxilici, dobbiamo considerare almeno due diversi sentieri nei quali addentrarci, in un percorso che simbolicamente possiamo far iniziare con una incisione realizzata circa 4.000 anni a.C. su di un ornamento di osso a forma di testa di toro reperito in Ucraina, sul quale la successione di punti scavati delinea, pur con grande schematicità, le forme di un lucanide.

È da ricordare al riguardo che prima che Filippo Silvestri con riferimento al “...legno in putrefazione...” coniasse il termine “*saproxilobionti*” in un pregevole lavoro del 1913 pubblicato sul Bollettino di Zoologia Generale e Agraria della Regia Scuola Superiore di Portici, dedicato alla descrizione di un nuovo ordine di insetti, gli Zoraptera, le specie più appariscenti oggi incluse tra i saproxilici

erano state spesso trattate nell'ambito delle arti figurate e delle leggende. In effetti un primo ambito nel quale alcuni tra i più rappresentativi e appariscenti insetti saproxilici, *Lucanus cervus* L. in primo luogo, compaiono in forme raffigurative diverse, è senz'altro l'ambito decorativo e artistico. Questa specie, ma anche altri vistosi coleotteri le cui larve vivono nel legno, hanno attratto l'interesse dei monaci che realizzavano gli stupendi "manoscritti illuminati", una delle testimonianze artistiche più importanti del Medioevo, per i quali basti l'esempio del codice di Giovannino De Grassi del 1370 conservato nella Biblioteca Nazionale. Per poi attraversare le opere dei grandi pittori rinascimentali come Albrecht Dürer, che nella sua "Adorazione dei Magi" del 1504 conservata nella Galleria degli Uffizi a Firenze, ha raffigurato con dovizia di particolari un maschio di cervo volante. Ma ancor prima deve senz'altro essere ricordato Leonardo Da Vinci, la cui voglia, quasi ansia, di comprendere il mondo naturale attraverso i propri occhi, anche con lo studio e il disegno delle più piccole creature della natura, non poteva non interessare gli insetti. Leonardo studiò la forma degli insetti con pochi e rari esempi ma realizzati con rara cura e realismo come nel caso del disegno di un *Morimus* sp. (1480) conservato nella Biblioteca Reale di Torino. Questo percorso di arte e raffigurazioni non si è mai interrotto ed è di estremo interesse condurlo fino alle opere di Jan Fabre, nipote di quel Jan Henri Fabre che scrisse i "Souvenir d'Entomologie" che ogni appassionato di entomologia ha letto almeno una volta. Le opere di Jan Fabre realizzate con alcuni tra i più bei coleotteri xilofagi, raccogliendo elitre e altri resti di insetti utilizzati per l'alimentazione umana, lanciano un messaggio sull'infinita adattabilità degli insetti ad ambienti mutevoli e sul loro contributo nel plasmare il pianeta e assicurarne la funzionalità.

Questo ci accompagna su di un altro versante che è quello della Storia delle Scienze. Sugli insetti non sono mancati contributi di quasi tutti quelli che delle scienze naturali si sono occupati: come mirabilmente evidenziato nel volume scritto a più mani "Gli Insetti nella scienza e nella cultura dall'antichità ai giorni nostri", curato da Alessandro Minelli nella consapevolezza di avere a che fare con "...un solido ramo dell'albero genealogico dei viventi". Ma se tanti sono stati i contributi sui più diversificati aspetti riguardanti gli insetti, per lungo tempo sono solo affiorate e in modo affievolito le ricerche e le trattazioni degli insetti legati alle parti durevoli delle piante arboree e arbustive considerati come "un gruppo funzionale". Molte delle trattazioni sugli insetti che oggi includiamo tra i saproxilici, per un lungo tratto degli ultimi due secoli, sono state limitate alle implicazioni della loro azione in condizioni di squilibrio degli ecosistemi forestali, come nei contesti delle formazioni di conifere derivate dalle trasformazioni che in Europa per soddisfare necessità di legname da opera avevano convertito ampie porzioni di territorio tanto che dal 1800 ad oggi, come ricordato da COVASSI (1989), nella sua disamina "Gli insetti e l'alterata dinamica degli ecosistemi di foresta. Criteri per il riassetto delle entomocenosi", il rapporto iniziale di 7:3 tra foreste di latifoglie decidue e conifere si è invertito.

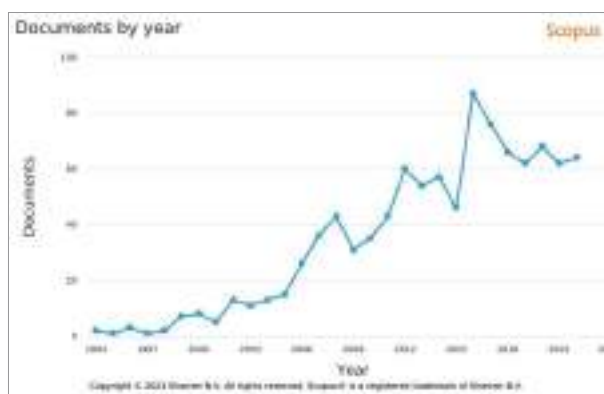


Fig. 1 - Numero di pubblicazioni indicizzate Scopus e pubblicate entro il 2022 che contengono la parola "saproxilic" all'interno del titolo o delle keywords.

Non si può peraltro tralasciare di evidenziare che già a partire dagli inizi dell'800 venivano redatte dettagliate descrizioni delle comunità di insetti associate ai tessuti durevoli di alberi e arbusti come nel lavoro di P.A. Latreille del 1802 e che progressivamente la consapevolezza del ruolo ecologico dei saproxilici nell'assicurare il funzionamento degli ecosistemi forestali è cresciuta con contributi specifici o inseriti in più ampie trattazioni. È il caso dei contributi di Roger Dajoz, dapprima limitati a singole formazioni boschive o gruppi tassonomici di insetti per poi diventare vere e proprie opere di ampio respiro come il testo "Écologie des insectes forestiers" del 1980, cui è importante aggiungere vari scritti tra cui il lavoro di Harmon *et al.* del 1986 dal titolo "Ecology of Coarse Woody Debris in Temperate Ecosystems" e l'opera di Andrzej Szujewski del 1987 "Ecology of Forest Insects".

Le ricerche dedicate allo studio e alla tutela della biodiversità delle comunità di insetti legati alle strutture durevoli delle piante e al «legno morto» in particolare si sviluppano in modo prorompente quando il Consiglio d'Europa avvia un progetto mirato a consentire l'utilizzo degli insetti del legno per stilare una lista delle foreste di importanza primaria e valutare lo stato delle comunità terrestri di decompositori. Il progetto culmina nei risultati pubblicati da M.C.D. Speight nel 1989, "Saproxilic invertebrates and their conservation". Gli studi successivi vedono anche la comparsa di pubblicazioni che cercano di dare una lettura ecosistemica ancora più ampia per la comprensione dei fenomeni legati al ciclo della sostanza organica in ambienti forestali e al riguardo si ricorda il capitolo "Arthropods and nematodes: functional biodiversity in forest ecosystems" inserito nel volume dall'indicativo titolo "Forest ecosystems more than just trees" del 2012.

Per arrivare in tempi ancora più recenti ad una ulteriore serie di contributi fino alla mirata sintesi curata da M.D. Ulyshen del 2018 del volume intitolato "Saproxilic insects", nel quale i saproxilici e i problemi della loro conservazione vengono estesamente trattati per i diversi biomi del pianeta senza tralasciare gli ambienti urbani.

GLI INSETTI SAPROXILICI: BIOLOGIA,  
ECOLOGIA, CONSERVAZIONE

Spesso nella storia del pensiero scientifico esiste un “prima” e un “dopo” e questo passaggio è segnato da un evento (in genere una scoperta accompagnata da una pubblicazione scientifica) che, individuando una nuova prospettiva nello studio di un problema o apportando nuove e sostanziali conoscenze, agisce come momento di cambiamento radicale. Nel caso dello studio dell’entomofauna saproxilica e della considerazione di questa componente biotica all’interno dei programmi di conservazione delle foreste, è possibile individuare questo spartiacque nel rapporto di Speight del 1989. Dopo di esso, infatti, gli studi sulla biologia ed ecologia dei “saproxilici”, la formazione di gruppi di ricerca e le sperimentazioni si arricchiscono e aumentano in numero, portando oggi ad un quadro conoscitivo ben più vasto anche se lungi dall’essere completo. Ecco che, dopo un periodo di fisiologico silenzio, necessario probabilmente per prendere nuova coscienza del problema, raccogliere e analizzare dati, assistiamo, a partire dal 2000, ad un incremento delle pubblicazioni in “materia saproxilica” che si mantiene sostanzialmente ininterrotto fino ad oggi (Fig. 1). Le definizioni stesse di organismo saproxilico si moltiplicano e generano dibattito (DAJOZ, 2000; MASON *et al.*, 2003; SCHMIDL & BUSSLER, 2004; ALEXANDER, 2008; STOCKLAND, 2012) e si registra l’interesse dell’IUCN che promuove la produzione di ben 3 liste rosse a scala multinazionale, due europee e una dedicata all’ambiente mediterraneo (CALIX *et al.*, 2018, GARCIA *et al.*, 2018), e una lista rossa italiana (CARPANETO *et al.*, 2015). Compagnano anche importanti monografie sul tema (STOCKLAND *et al.*, 2012; ULYSHEN, 2018). Da un punto di vista geografico, i principali paesi (e gruppi di ricerca) europei abbracciano in modo omogeneo la problematica dello studio degli insetti saproxilici, con l’eccezione della Svezia, per la quale si registra il doppio della produzione scientifica rispetto agli altri paesi (Fig. 2).

Come naturale conseguenza di questo nuovo fermento culturale, nasce il “Simposio internazionale per la conservazione degli insetti saproxilici”, che oggi conta ben 10 edizioni:

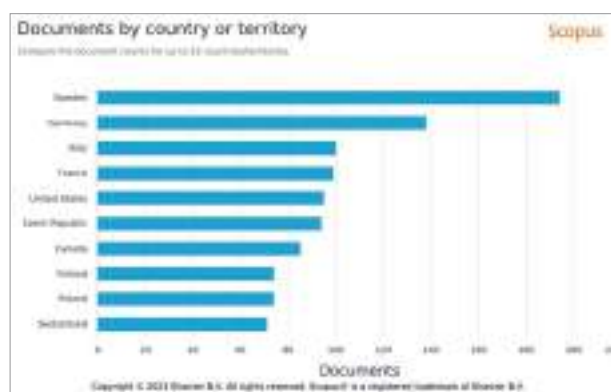


Fig. 2 - Paesi di afferenza per le pubblicazioni indicizzate Scopus e pubblicate entro il 2022 che contengono la parola “saproxilic” all’interno del titolo o delle keywords.

1999 Vardnäs (Svezia), 2002 London (Regno Unito), 2004 Riga (Lettonia), 2006 Vivoin (Francia), 2008 Luneburg (Germania), 2010 Ljubljana (Slovenia), 2012 Granada (Spagna), 2014 Basel (Svizzera), 2016 Genk (Belgio), 2018 Nationalparkverwaltung Bayerischer Wald (Germania)

Fra gli insetti, sono i coleotteri a includere il maggior numero di specie saproxiliche, con circa 4.000 specie in Europa e una elevata diversità da un punto di vista ecologico e morfologico. È quindi su di loro che si concentra il maggior numero di ricerche e progetti. Ciò detto, per comprendere appieno le modalità con cui il complesso meccanismo di degradazione del legno morto si sviluppa nel tempo e nello spazio, sono necessari un approccio di biodiversità funzionale e quelle chiavi ecologiche che permettano di descrivere le complesse interazioni con le altre componenti, biotiche e abiotiche, dell’ecosistema forestale.

Da un punto di vista puramente fisico, la degradazione, è opera di larve xilofaghe di insetti che demoliscono il legno producendo gallerie e che, con il loro avanzare, rendono sempre maggiore la porzione di legno esposta. Da un punto di vista chimico sono batteri e funghi che, grazie alle loro artiglierie enzimatiche, riescono a smantellare le complesse molecole che costituiscono il legno (cellulosa, emicellulosa, lignina) trasformandole in composti semplici e maggiormente assimilabili degli animali. I due tipi di azioni avvengono spesso in modo sinergico. Batteri e funghi, infatti, “trovano la strada” grazie alle gallerie degli insetti oppure entrano nel legno all’interno degli insetti stessi. In altri casi gli insetti si appropriano di enzimi “altrui”, per lo più derivanti da funghi, che una volta ingeriti vengono riutilizzati per la decomposizione del legno.

Osservando al timelapse la degradazione di un tronco il processo risulta particolarmente complesso e dipendente da innumerevoli fattori, come le caratteristiche del legno, la posizione, le caratteristiche della foresta, il microclima e la regione biogeografica. Nel corso di questo processo si osserva un continuo mutare nella componente di insetti che colonizza il legno. I consumatori di floema, o saproxilici primari, raggiungono il tronco subito dopo la morte dell’albero: più o meno consapevoli trasportatori di batteri e funghi, essi giocheranno un ruolo fondamentale nell’avviare l’intero processo. Quella dei saproxilici primari è una consumazione rapida, che fa esaurire in breve la parte più prelibata parte del tronco, il libro, ma che lascia spazio ad una nuova generazione di saproxilici in grado di addentrarsi nell’alburno, scavando gallerie che saranno utilizzate, a loro volta, da nuove generazioni di colonizzatori. Con il passare del tempo, quando il materiale legnoso è oramai infestato da ife fungine e appare pastoso e malleabile, convivono specie con diverse abitudini alimentari, gli xilofagi obbligati e i più generalisti xilomicetofagi o micetofagi. Esse stesse sono fonte di cibo, queste specie intente demolire il legno sono infatti preda di parassiti, parassitoidi o predatori, contribuendo a generare una rete trofica sempre più complessa.

Il legno non è solo risorsa trofica, ma anche riparo, rifugio o sito di nidificazione. Un albero morto può quindi

rappresentare un condominio variegato di organismi saproxilici dove imenotteri sociali, mammiferi, rettili, uccelli condividono fessure, cavità, anfratti con altri insetti dalle più disparate esigenze alimentari.

Il legno attraverserà fasi di degradazione via via maggiori, sino al punto limite oltre il quale sarà difficile distinguere la fauna saproxilica da quella tipica del suolo. È in questa fase che il lungo ciclo del legno morto si conclude, con il completo riutilizzo di tutta la sua materia a beneficio dell'ecosistema forestale.

Sorvegliare e conservare questa complessa comunità di organismi equivale a conoscere e a gestire pienamente una foresta. Non meraviglia, quindi, l'evidenza che 12 delle 15 specie di coleotteri protette dalla Direttiva Habitat siano saproxiliche e come nel tempo siano fioriti progetti per la loro protezione, anche grazie al programma LIFE della Commissione Europea.

In Italia, il progetto LIFE 11 NAT/IT/0052 "MIPP" (Monitoring of insects with public participation) ha prodotto i protocolli di monitoraggio nazionale delle più importanti specie di coleotteri saproxilici (CARPANETO *et al.* 2017), che sono ora adottati nei siti Natura 2000 per il monitoraggio dello stato di conservazione delle specie protette (ex art. 17 della Direttiva Habitat). Il progetto MIPP ha coinvolto attivamente nella ricerca anche i "non addetti", primo progetto di citizen science incentrato sugli insetti. A un lustro dalla fine del progetto, le conoscenze sulla distribuzione spaziale di alcune specie di coleotteri continuano ad essere alimentate proprio dai cittadini con l'applicazione InNat ([www.innat.it](http://www.innat.it)).

Con il progetto LIFE ESC/IT/001 ESC360 infine, "360 volunteers for monitoring forest biodiversity in the Italian Natura 2000 network" centinaia di giovani volontari sono stati istruiti sulle modalità di monitoraggio standard dei coleotteri saproxilici, per una scienza sempre più partecipata.

#### 15 ANNI DI STUDI SUL CERVO VOLANTE: L'ESPERIENZA DI BOSCO FONTANA

La Riserva Naturale Statale di Bosco della Fontana, situata in provincia di Mantova, ospita al suo interno un Quercio-carpinetto planiziale relitto di circa 200 ha, ricco di legno morto (mediamente 30 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>). Questa foresta rappresenta l'habitat ideale per uno dei coleotteri più grandi e conosciuti dell'entomofauna europea: *Lucanus cervus* (Linnaeus, 1758). Questa specie, saproxilica obbligata in quanto la larva si sviluppa all'interno di legno marcescente, trova il suo ambiente naturale nelle foreste mature decidue. La drastica riduzione e frammentazione del suo habitat, ha fatto sì che il cervo volante fosse inserito tra le specie protette dalla Direttiva Habitat (92/43/CEE).

E proprio nella Riserva di Bosco Fontana, da una quindicina di anni, il Centro Nazionale Carabinieri Biodiversità "Bosco Fontana" effettua studi, anche in collaborazione con altri enti a livello nazionale o gruppi di lavoro europei, sul monitoraggio e la bio-ecologia di *Lucanus cervus*. Esempi di queste ricerche sono:

- l'utilizzo dei resti di predazione per i) studiare l'allo-

metria delle mandibole dei maschi (HARDERSEN *et al.*, 2011) e, ii) per valutare la loro efficacia come metodo di monitoraggio della popolazione ed ottenere anche informazioni di carattere fenologico e distributivo della specie nella Riserva (CAMPANARO *et al.*, 2011);

- la collaborazione europea per un test su larga scala di un metodo di monitoraggio basato sull'avvistamento di adulti in volo al crepuscolo lungo transetti (CAMPANARO *et al.*, 2016);
- l'esperienza del progetto Life MIPP ("Monitoring of insects with public participation"), nel quale è stato possibile confrontare diversi metodi di monitoraggio (come l'avvistamento di adulti in volo al crepuscolo lungo transetti, l'uso di trappole attrattive non letali e la raccolta di resti di predazione) (CARPANETO *et al.*, 2017) al fine di individuare un metodo standard di monitoraggio per assolvere agli obblighi previsti dall'articolo 11 della Direttiva Habitat;
- lo studio di radio telemetria per indagare la dispersione e l'attività giornaliera degli individui nella Riserva (TINI *et al.*, 2018) (Fig. 3).



Fig. 3 - Individuo femmina di *Lucanus cervus* con trasmettente applicata durante lo studio di radio telemetria (Foto di M. Bardiani).

Inoltre, il Centro ha avviato ricerche a livello nazionale nell'ambito della *Citizen science*: sia attraverso lo sviluppo di un programma specifico per la segnalazione di specie protette, tra cui anche *Lucanus cervus*, (prima con il progetto Life MIPP e successivamente con il progetto InNat - [www.innat.it](http://www.innat.it)) e finalizzato ad ottenere dati di presenza puntuali; sia consentendo a cittadini volontari di effettuare direttamente i monitoraggi di *L. cervus* applicando i protocolli *standard* previsti (Life ESC360 - [www.life360esc.eu](http://www.life360esc.eu); European Stag Beetle Monitoring Network - <https://www.stagbeetlemonitoring.org/>).

#### I PROTOCOLLI DI MONITORAGGIO PER I COLEOTTERI SAPROXILICI DELLA DIRETTIVA HABITAT

Il progetto Life "Monitoring of insects with public participation" (LIFE11 NAT/IT/000252), terminato nel 2017, ha avuto come obiettivo principale lo sviluppo di



metodi *standard* per il monitoraggio di cinque specie di coleotteri saproxilici elencate negli allegati II e IV della Direttiva Habitat (92/43/CEE): *Lucanus cervus* (Linnaeus, 1758); *Osmoderma eremita* (Scopoli, 1763); *Cerambyx cerdo* Linnaeus, 1758; *Rosalia alpina* (Linnaeus, 1758); il “complesso” *Morimus asper* (Sulzer, 1776)/*Morimus funereus* Mulsant, 1863. I monitoraggi di queste specie sono un obbligo e permettono di ottenere una valutazione complessiva del loro stato di conservazione nelle varie regioni biogeografiche. In Italia le Regioni e le Province autonome sono gli enti responsabili per questi monitoraggi ed è importante che i dati siano raccolti in modo standardizzato, perché solo così possono essere accorpati ed analizzati per una valutazione complessiva.

Lo sviluppo dei metodi di monitoraggio è iniziato con un approfondito studio della letteratura scientifica ed in seguito, per colmare le lacune nella conoscenza, è stata attuata una sperimentazione “sul campo”. Ad esempio, per *Morimus asper/funereus*, sono state indagate la differente attrattività del legno morto per diverse specie arboree (es. tra *Carpinus betulus* e *Quercus ro-*



Fig. 4 - Monitoraggio di *Morimus funereus* con una catasta di faggio (*Fagus sylvatica*) nel Parco Naturale delle Prealpi Giulie.

*bur*) ed il tempo che un tronco tagliato rimane attrattivo. Le ricerche “sul campo” per *M. asper/funereus* si sono svolte in due aree principali: Bosco della Fontana (MN), riserva naturale gestita dall’Arma dei Carabinieri, e nel Parco Naturale Regionale delle Prealpi Giulie (UD). Parallelamente, sono stati raccolti dati sulla distribuzione e fenologia della specie *target*, con l’approccio della *citizen science* che ha coinvolto 695 cittadini con 2.308 segnalazioni. Questi dati hanno permesso, ad esempio, di stimare la variazione del periodo di massima attività di *M. asper/funereus* durante l’anno. Le informazioni raccolte, unitamente a considerazioni di carattere operativo (es.: tronchi tagliati in segmenti possono essere trasportati facilmente, mentre lo spostamento di un tronco intero richiede l’utilizzo di macchinari forestali), sono state utilizzate per la definizione del protocollo *standard* di monitoraggio per *M. asper/funereus*. Il metodo prevede, per ogni sito di monitoraggio, la costruzione

di sette cataste di 0,30 m<sup>3</sup> e cinque uscite serali di due operatori (Fig. 4). I dettagli di questa metodologia sono stati pubblicati, insieme ai monitoraggi per le altre specie sopraelencate, nel volume “Linee Guida per il monitoraggio dei coleotteri saproxilici protetti in Europa” (CARPANETO *et al.*, 2017). Le tecniche di monitoraggio sono destinate principalmente ai gestori di aree protette e garantiscono validità scientifica, facilità di esecuzione e costi contenuti.

#### COLEOTTERI SAPROXILICI E INDICATORI DI BIODIVERSITÀ IN ECOSISTEMI FORESTALI DELL’APPENNINO, IL CASO DEGLI *OPEN DATASET* PER LA CONSERVAZIONE

Nell’ambito del monitoraggio della biodiversità forestale, i data paper rappresentano una fonte essenziale di informazioni e di dati, che si rendono fruibili e disponibili a tutti e che possono essere di grande utilità, soprattutto ai gestori forestali.

In riferimento alla biodiversità legata al legno morto, i coleotteri sono la componente più numerosa ed anche più minacciata tra gli organismi saproxilici (PARISI *et al.*, 2021). In tal senso, i data paper, pur non essendo numerosi oggi, possono rendersi utili per incrementare le conoscenze biologiche ed ecologiche delle specie di insetti, soprattutto in relazione alla perdita di biodiversità e all’estinzione delle specie.

Un esempio interessante di data paper è CAMPANARO & PARISI (2021), in cui è contenuta una lista di coleotteri saproxilici che raccoglie un totale di 1171 esemplari, appartenenti a 918 specie e di cui l’80.2% risulta esclusivo. Tra queste specie, ne sono state raccolte alcune a rischio e incluse nella Lista Rossa dei Coleotteri Saproxilici Italiani (IUCN). In particolare, quattro appartengono alla categoria di minaccia CR (Critically Endangered), cinque alla EN (Endangered) e sedici alla VU (Vulnerable). I dati si riferiscono ad attività di monitoraggio svolte in Italia, tra il 2012 e il 2017, in alcuni contesti forestali dell’Appennino e che hanno interessato anche diverse aree protette (ad esempio, Parco Nazionale del Gran Sasso e Monti della Laga e Parco Nazionale del Cilento, Vallo di Diano e Alburni).

Attualmente, ulteriori attività di monitoraggio sono in corso, principalmente in Toscana, il cui obiettivo è quello di indagare le relazioni ecologiche che intercorrono tra le varie componenti della biodiversità forestale, come struttura forestale, legno morto, microhabitat, uccelli e coleotteri saproxilici. Inoltre, di profondo interesse è applicare la stessa metodologia di campionamento e di analisi anche in contesti urbani, dove solo alcuni artropodi sono in grado di prosperare e in cui la composizione specifica e la gestione delle foreste urbane è sostanzialmente diversa dai contesti più naturali.

Nell’ultimo decennio, inoltre, grande interesse è nato attorno all’utilizzo del remote sensing a supporto del monitoraggio della biodiversità condotto in campo. Infatti, analisi e indagini in tal senso sono in corso in alcuni siti monitorati in Appennino. I dati telerilevati, essendo disponibili e con una elevata risoluzione temporale e spa-

ziale, sono vantaggiosi in quando possono permettere analisi ad ampia scala e ripetute nel tempo, oggettive ed immediate della struttura forestale, utili per l'individuazione di hotspot di biodiversità.

I risultati ottenuti dalle attività in corso saranno anch'essi resi disponibili attraverso open dataset.

#### RIASSUNTO

Gli insetti saproxilici sono una componente fondamentale dell'ecosistema forestale. Tuttavia la loro importanza e la necessità della loro conservazione non è ancora realmente compresa e applicata a livello gestionale nella maggioranza delle foreste europee. La tavola rotonda si propone di illustrare definizioni, evoluzione scientifica, tecniche di monitoraggio di questo gruppo funzionale.

#### BIBLIOGRAFIA

- ALEXANDER K.N.A., 2008 - *Tree biology and saproxyl-ic Coleoptera: issues of definitions and conservation language*. - Revue d'Ecologie (La Terre et la Vie), Supplement 10: 9–13.
- CÁLIX M., ALEXANDER K.N.A., NIETO A., DODELIN B., SOLDATI F., TELNOV D., VAZQUEZ-ALBALATE X., ALEKSANDROWICZ O., AUDISIO P., ISTRATE P., JANSSON N., LEGAKIS A., LIBERTO A., MAKRIKIS C., MERKL O., MUGERWA PETERSSON R., SCHLAGHAMERSKY J., BOLOGNA M.A., BRUSTEL H., BUSE J., NOVÁK V., PURCHART L., 2018 - *European Red List of Saproxyl-ic Beetles*. - IUCN, Brussels.
- CAMPANARO A., ZAPPONI L., HARDERSEN S., MÉNDEZ M., AL FULAJI N., AUDISIO P., BARDIANI M., CARPANETO G.M., COREZZOLA S., DELLA ROCCA F., HARVEY D., HAWES C., KADEJ M., KARG J., RINK M., SMOLIS A., SPRECHER E., THOMAES A., TONI I., VREZEC A., ZAULI A., ZILIOI M., CHIARI S., 2016 - *A European monitoring protocol for the stag beetle, a saproxyl-ic flagship species*. - Insect Conservation and Diversity, 9: 574–584. <https://doi.org/10.1111/icad.12194>.
- CAMPANARO A., PARISI F., 2021 - *Open datasets wanted for tracking the insect decline: let's start from saproxyl-ic beetles*. - Biodiversity Data Journal, 9: e72741. <https://doi.org/10.3897/BDJ.9.e72741>.
- CAMPANARO A., TONI I., HARDERSEN S., GRASSO D.A., 2011 - *Monitoring of Lucanus cervus by means of Remains of Predation (Coleoptera: Lucanidae)*. - Entomologia generalis, 33 (1/2): 79–89.
- CARPANETO G.M., BAVIERA C., BISCACCANTI A.B., BRANDMAYR P., MAZZEI A., MASON F., BATTISTONI A., TEOFILI C., RONDININI C., FATTORINI S., AUDISIO P., 2015 - *A Red List of Italian Saproxyl-ic Beetles: taxonomic overview, ecological features and conservation issues (Coleoptera)*. - Fragmenta Entomologica, 47(2): 53–126. <https://doi.org/10.13133/2284-4880/138>
- CARPANETO G.M., AUDISIO P., BOLOGNA M.A., ROVERSI P.F., MASON F., 2017 - *Guidelines for the Monitoring of the Saproxyl-ic Beetles protected in Europe*. - Pensoft, Sofia.
- COVASSI M.V., 1989 - *Gli insetti e l'alterata dinamica degli ecosistemi di foresta. Criteri per il riassetto delle entomocenosi*. In: Atti del Convegno sulle Avversità del Bosco e delle specie Arboree da Legno, Firenze 15-16 ottobre 1987: 405–447.
- DAJOZ R., 2000 - *Insects and forests. The role and diversity of insects in the forest environment*. - Intercept, London.
- GARCÍA N., NUMA C., BARTOLOZZI L., BRUSTEL H., BUSE J., NORBIATO M., RECALDE J.I., ZAPATA J.L., DODELIN B., ALCÁZAR E., BARRIOS V., VERDUGO A., AUDISIO P., MICÓ E., OTERO J. C., BAHILLO P., VIÑOLAS A., VALLADARES L., MÉNDEZ M., EL ANTRY S., GALANTE E., 2018 - *The conservation status and distribution of Mediterranean saproxyl-ic beetles*. IUCN, Malaga.
- HARDERSEN S., MACAGNO A.L.M., SACCHI R., TONI I., 2011 - *Seasonal constraints on the mandible allometry of Lucanus cervus (Coleoptera: Lucanidae)*. - European Journal of Entomology, 108: 461–468. <https://doi.org/10.14411/eje.2011.059>.
- MASON F., NARDI G., TISATO M., 2003 - *Proceedings of the International Symposium "Dead wood: a key to biodiversity", 29th-31st May 2003, Mantova*. - Sherwood, 95, Supplement 2.
- PARISI F., MORANDINI V., DE SANTIS E., COCOZZA C., CHIRICI G., GALIPÒ G., SAVELLI G., TRAVAGLINI D., 2021 - *Coleotteri del legno e microhabitat forestali nei boschi misti di abete bianco e faggio della Riserva di Vallombrosa*. - L'Italia Forestale e Montana, 76 (6): 315-329. <https://dx.doi.org/10.4129/ifm.2021.6.02>.
- STOKLAND J.N., SIITONEN J., JONSSON B.G., 2012 - *Biodiversity in dead wood*. Cambridge University Press, Cambridge.
- TINI M., BARDIANI M., CHIARI S., CAMPANARO A., MAURIZI E., TONI I., MASON F., AUDISIO P.A., CARPANETO G.M., 2018 - *Use of space and dispersal ability of a flagship saproxyl-ic insect: a telemetric study of the stag beetle (Lucanus cervus) in a relict lowland forest*. - Insect Conservation and Diversity, 11: 116–129. <https://doi.org/10.1111/icad.12260>.
- ULYSHEN M.D., 2018 - *Saproxyl-ic Insects, Diversity, Ecology and Conservation*. - Zoological Monographs. Springer, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-75937-1>.

SEDUTA PUBBLICA, FIRENZE, 10 GIUGNO 2022

Tavola Rotonda su:

BIOLOGICAL PEST CONTROL: MANAGING MULTITROPHIC INTERACTIONS  
FOR SUSTAINABLE AGRICULTURE

Coordinatori:

LUCIA ZAPPALÀ e

GAETANO SISCARO

Accademici



## IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON INVERTEBRATE BIOLOGICAL CONTROL

JOSEP A. JAQUES <sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Departament de Biologia, Bioquímica i Biotecnologia; Universitat Jaume I; E-12071-Castelló de la Plana (Spain); email: josep.jaques@camn.uji.es*

Lettura tenuta durante la Tavola Rotonda “Biological pest control: managing multitrophic interactions for sustainable agriculture”. Seduta pubblica dell’Accademia – Firenze, 18 giugno 2022.

### *Impact of climate change on invertebrate biological control*

Climate change can have dramatic direct effects on the physiology, phenology and distribution of any living species but it may also indirectly affect them through the disruption of species interactions across trophic levels. The species with the highest specialization in terms of lifestyle or habitat are more vulnerable and due to the bottom-up amplification effect in trophic webs subjected to any kind of disturbance, natural enemies are expected to suffer the effects of CC to a greater extent than the herbivores they feed and develop on. The effects on biological control are discussed.

KEY WORDS: natural enemies, parasitoid, predator, food web, Mediterranean basin

Climate change (CC) will most probably result in an increase in temperature extremes and aridity in the Mediterranean Basin (IPCC 2022), which is one of the most vulnerable regions to CC (AGUILAR-FENOLLOSA and JACAS, 2014; URBANEJA-BERNAT *et al.*, 2019) (Fig. 1).

include species with (a) specialised habitat and/or microhabitat requirements, (b) narrow environmental tolerances or thresholds likely to be exceeded owing to CC, (c) dependence on specific environmental triggers or cues likely to be disrupted by CC, (d) dependence on

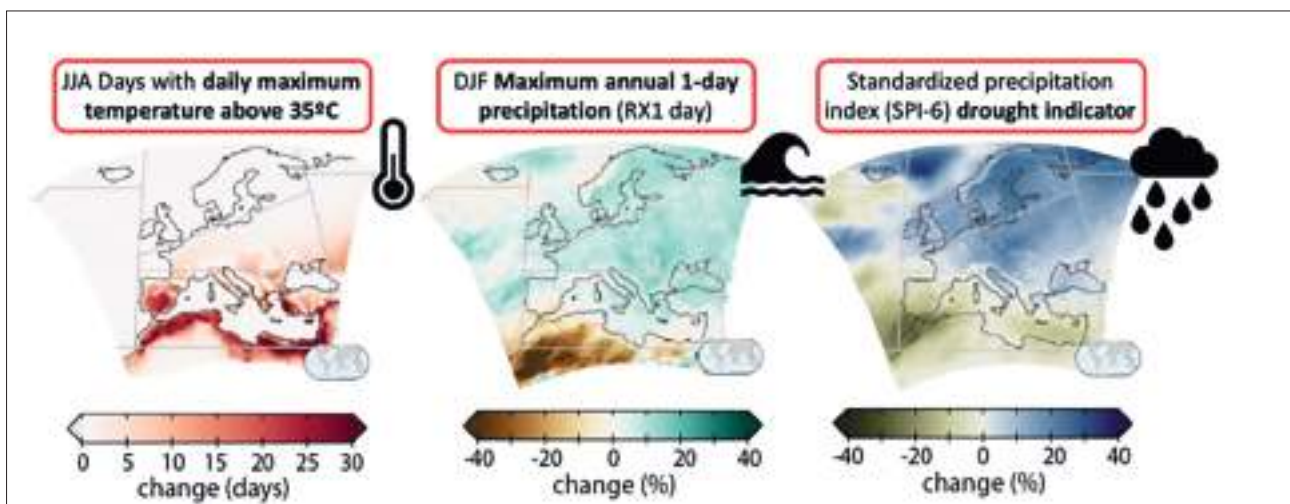


Fig. 1 - Projected changes for 2041-2060 relative to 1995-2014 according to IPCC (2022).

CC can have dramatic direct effects on the physiology, phenology and distribution of any living species but it may also indirectly affect them through the disruption of species interactions across trophic levels. This may eventually lead to a rearrangement of communities through asymmetric changes in competitive, ‘bottom-up’ and ‘top-down’ control effects. As a consequence, biological control may be impaired.

FODEN *et al.* (2008) proposed a set of features that would make a species more susceptible to CC. These

interspecific interactions likely to be disrupted by CC and (e) poor ability or limited opportunity to disperse to, or colonise, a new or more suitable range. Therefore, those species with the highest specialisations in terms of lifestyle or habitat are typically more vulnerable. Because a bottom-up amplification effect often occurs in trophic webs subjected to any kind of disturbance, natural enemies are expected to suffer the effects of CC to a greater extent than their phytophagous hosts/preys, with indigenous generalist predators and

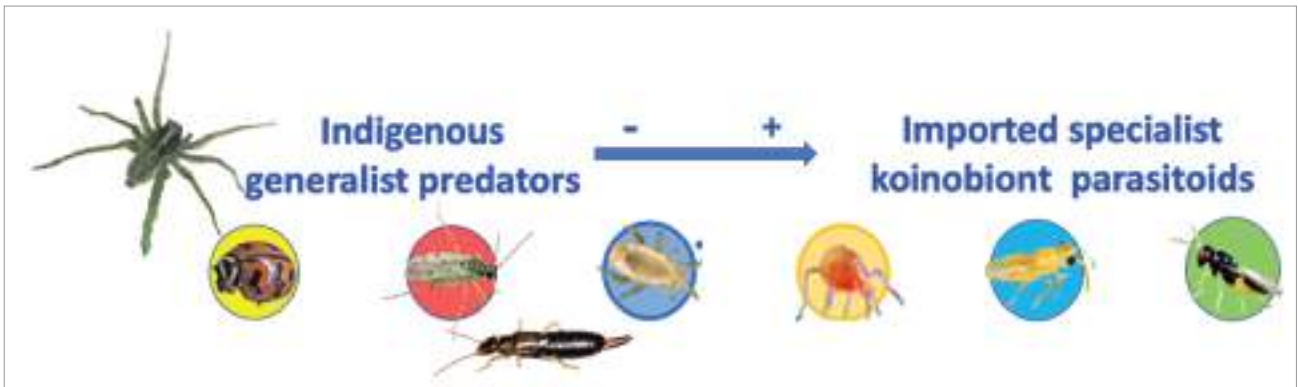


Fig. 2 - Increased vulnerability to CC of arthropod natural enemies according to their lifestyles.

imported specialist koinobiont parasitoids occupying extreme positions in a continuum of vulnerability to CC (Fig. 2).

Direct effects of CC on the physiology of plants include (a) increased sugar content, (b) reduced palatability/ nutritional quality as the C:N ratio increases, (c) higher content of secondary metabolites, and (d) changes in the activation of defense pathways, which overall may have opposite results on plant productivity. Those on the physiology of herbivores comprise (a) enhanced metabolism, (b) enhanced herbivory, (c) changes in chemical defenses accumulated from plants and (d) suicidal diapause, as photoperiod cues may no longer match thermal thresholds. Most of these physiological changes could also affect natural enemies and result in higher mortality from consuming toxic host

or prey. The direct effects of CC on the phenology of any living being in temperate climates is an enlarged window for development, which in the case of insects would reduce generation time and increase voltinism, which could result in developmental traps due to asynchronous cycles with host plant/s for herbivores and with host/prey for natural enemies. All these direct changes may lead to the replacement of current crops/ cultivars no longer adapted to pre-CC environmental conditions. Such a replacement may lead to changes in the pest status of any herbivore, from non-economic to key pest and vice-versa and to losses of efficacy of biological control agents. Importantly, this may be coupled with an increased use of chemical control with all its side-effects.

In recent times, the replacement of the *Citrus Tristeza Virus* (CTV)-susceptible rootstock sour orange by CTV-tolerant ones prompted by the establishment of CTV in Spain, has been pointed out as the trigger for *Tetranychus urticae* Koch (Acari: Prostigmata) to change from a non-economic pest into a key-pest of mandarins (BRÜSSOW *et al.*, 2010). As some CTV-tolerant rootstocks are also tolerant to osmotic stress, these rootstocks may become more common in a future arid Mediterranean. This could further increase the impact of *T. urticae* in the near future. Interestingly, this change of pest status should be attributed not only to a bottom-up effect through the host plant (AGUT *et al.*, 2014, 2015, 2016) but also to a top-down effect through natural enemies (CABEDO-LÓPEZ *et al.*, 2019; CRUZ-MIRALLES *et al.*, 2019, 2021a, 2021b, 2022). Indeed, these authors showed how citrus rootstocks affected attraction/repellence patterns of intraguild predators of *T. urticae* (phytoseiid mites), resulting in less frequent interference among phytoseiids in CTV-susceptible sour orange relative to CTV-tolerant Cleopatra mandarin. These effects combined with increased predation risk for *T. urticae* in sour orange relative to Cleopatra mandarin, could contribute to explaining the observed change in pest status when sour orange was massively replaced by CTV-tolerant rootstocks in Spain a few decades ago (Fig. 3). This example illustrates how indirect effects of CC through the disruption of species interactions may hamper biological control. In this case, disruption affected a system in which both the

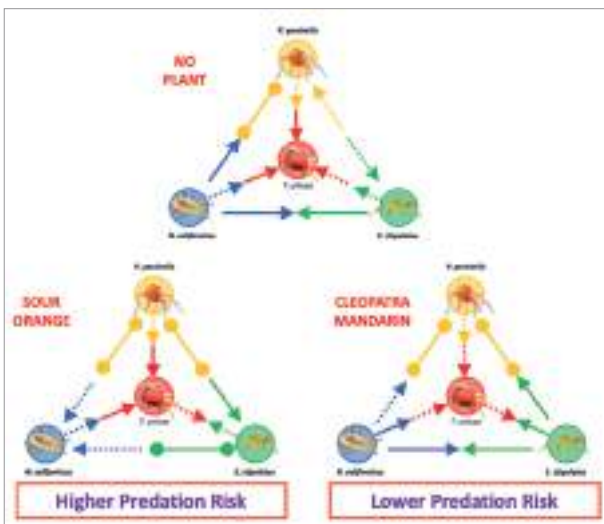


Fig. 3 - Interactions observed between the phytoseiid mites *Phytoseiulus persimilis*, *Neoseiulus californicus*, and *Euseius stipulatus*, and their shared prey, *Tetranychus urticae*. Arrowheads reflect behavioral responses of *P. persimilis* (orange), *N. californicus* (blue), *E. stipulatus* (green), and *T. urticae* (red) with no background odors and those corresponding to sour orange and Cleopatra mandarin. Arrowheads point at the preferred odor source. The results of these interactions include pursuit (gg), mutual attraction (gf), mutual avoidance (fg), avoidance (-g), and attraction (g). Continuous and dotted lines represent trends at  $P \leq 0.05$  and  $0.06 > P > 0.05$ , respectively (figure from Cruz-Miralles *et al.*, 2022)

Tab.1 - Types of biological control (BC) strategies based on the geographical origins of pest and natural enemy (NE) and the history of their association

Type of BC	Origin of		New environment?	Coevolution
	pest	NE		
Classical	Exotic	(same for both)	For both	Yes
New association, classical	Exotic	(different for both)	For both	No
Fortuitious	Exotic	Indigenous	For pest only	No
Neoclassical	Indigenous	Exotic	For NE only	No
Conservation, natural	Indigenous		No	Yes

pest and the natural enemies are indigenous and have co-evolved. Coevolution should make this type of biological control more robust to the impact of CC. However, this is not always the case. According to the origin of the pest and the natural enemy, different types of BC can be defined (Table 1). The robustness of these systems depends on these origins and it may help predict how these associations may respond to CC. The potential of natural enemies to adapt to CC depend on their plasticity, which should be maximal for indigenous natural enemies (i.e., conservation biological control) but could be rather limited for imported natural enemies, either in the context of naturalized natural enemies established as a result of a classical biological control program, or when used in augmentative releases.

Adaptation to CC in the case of biological control methods exploiting exotic natural enemies should consider practices during collection, quarantine, rearing and releasing of these natural enemies aimed at maximizing the conservation of genetic diversity. Even in this case, though, these natural enemies may not be able to successfully control the pest and pest outbreaks could be increasingly frequent. This failure should make reliance on indigenous natural enemies and adoption of conservation biological control practices the cornerstone of future biological control, even of exotic pests. In this context, habitat manipulation, including the management of non-crop vegetation, could prove crucial to support diverse plant-herbivore-entomophagous food webs resulting in more resilient cropping systems. For this reason a thorough understanding of food web relationships is required to respond to the challenges posed by CC.

#### REFERENCES

- AGUILAR-FENOLLOSA E., JACAS J.A., 2014 - *Can we forecast the effects of climate change on entomophagous biological control agents?* - Pest Manag. Sci., 70 : 853-859. <https://doi.org/10.1002/ps.3678>
- AGUT B., GAMIR J., JACAS J.A., HURTADO M., FLORS V., 2014 - *Different metabolic and genetic responses in citrus may explain relative susceptibility to Tetranychus urticae.* - Pest Manag. Sci., 70 : 1728-1741. <https://doi.org/10.1002/ps.3718>
- AGUT B., GAMIR J., JAQUES J.A., FLORS V., 2015 - *Tetranychus urticae-triggered responses promote genotype-dependent conspecific repellence or attractiveness in citrus.* - The New Phytologist, 207: 790-804. <https://doi.org/10.1111/nph.13357>
- AGUT B., GAMIR J., JAQUES J.A., FLORS V., 2016 - *Systemic resistance in citrus to Tetranychus urticae induced by conspecifics is transmitted by grafting and mediated by mobile amino acids.* - J. Exp. Bot., 67: 5711-5723. <https://doi.org/10.1093/jxb/erw335>
- BRUSSFOW F., ASINS M.J., JACAS J.A., URBANEJA A., 2010 - *Replacement of CTV-susceptible sour orange rootstock by CTV-tolerant ones may have triggered outbreaks of Tetranychus urticae in Spanish citrus.* - Agric. Ecosyst. Environ., 137: 93-98. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.01.005>
- CABEDO-LÓPEZ M., CRUZ-MIRALLES J., VACAS S., NAVARRO-LLOPIS V., PÉREZ-HEDO M., FLORS V., JAQUES J.A., 2019 - *The olfactory responses of Tetranychus urticae natural enemies in citrus depend on plant genotype, prey presence, and their diet specialization.* - J. Pest Sci., 92(3): 1165-1177. <https://doi.org/10.1007/s10340-019-01107-7>
- CRUZ-MIRALLES J., CABEDO-LÓPEZ M., PÉREZ-HEDO M., FLORS V., JAQUES J.A., 2019 - *Zoophytophagous mites can trigger plant genotype specific defensive responses affecting potential prey beyond predation: The case of Euseius stipulatus and Tetranychus urticae in citrus.* - Pest Manag. Sci., 75(7): 1962-1970. <https://doi.org/10.1002/ps.5309>
- CRUZ-MIRALLES J., CABEDO-LÓPEZ M., GUZZO M., IBÁÑEZ-GUAL M.V., FLORS V., JAQUES J.A., 2021a - *Plant-feeding may explain why the generalist predator Euseius stipulatus does better on less defended citrus plants but Tetranychus sp.-specialists Neoseiulus californicus and Phytoseiulus persimilis do not.* - Exp. Appl. Acarol., 83: 167-182. <https://doi.org/10.1007/s10493-020-00588-x>
- CRUZ-MIRALLES J., CABEDO-LÓPEZ M., GUZZO M., PÉREZ-HEDO M., FLORS V., JAQUES J.A., 2021b - *Plant defense responses triggered by phytoseiid predatory mites (Mesostigmata: Phytoseiidae) are species-specific, depend on plant genotype and may not be related to direct plant feeding.* - BioControl, 66(3): 381-394. <https://doi.org/10.1007/s10526-021-10077-8>
- CRUZ-MIRALLES J., CABEDO-LÓPEZ M., GUZZO M., VACAS S., NAVARRO-LLOPIS V., IBÁÑEZ-GUAL M.V., FLORS V., MONTERRAT M., JAQUES J.A., 2022 - *Host plant scent*

*mediates patterns of attraction/repellence among predatory mites.* - Entomol. Gen., 2: 217–229; doi: 10.1127/entomologia/2021/1237

FODEN W., MACE G., VIÉ J.C., ANGULO A., BUTCHART S.H.M., DEVANTIER L., DUBLIN H.T., GUTSCHE A., STUART S., TURAK E., 2008 - *Species susceptibility to climate change impacts, in Wildlife in a Changing World: an analysis of the 2008 IUCN Red List of Threatened Species*, ed. by Vie JC, Hilton-Taylor C and Stuart SN. IUCN, Gland, Switzerland, pp. 77–88 (2008). IPPC (2022). 6th Assessment Report. [\[www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/factsheets/IPCC\\\_AR6\\\_WGI\\\_Regional\\\_Fact\\\_Sheet\\\_Europe.pdf\]\(https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/factsheets/IPCC\_AR6\_WGI\_Regional\_Fact\_Sheet\_Europe.pdf\)\)](https://</a></p></div><div data-bbox=)

URBANEJA-BERNAT P., IBÁÑEZ-GUAL V., MONTSERRAT M., AGUILAR-FENOLLOSA E, JAQUES J.A., 2019 - *Can interactions among predators alter the natural regulation of an herbivore in a climate change scenario? The case of Tetranychus urticae and its predators in citrus.* - J. Pest Sci., 92: 1149-1164. <https://doi.org/10.1007/s10340-019-01114-8>



## RECENT ADVANCES IN CLASSICAL BIOLOGICAL CONTROL OF KEY HORTICULTURE PESTS: AFRICAN PERSPECTIVE

SAMIRA A. MOHAMED<sup>a</sup> - REHEMAH GWOKYALYA<sup>a</sup> - SAHADATOU MAMA SAMBO<sup>a</sup> - SHEPARD NDLELA<sup>a</sup>  
- ABDELMUTALAB GESMALLA<sup>a</sup> - FRANCIS OBALA<sup>a</sup> - PASCAL AIGBEDION-ATALOR<sup>b</sup> - PASCAL AYELO<sup>a</sup> -  
SUNDAY EKESI<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*The International Centre of Insect Physiology and Ecology (icipe), Kenya*

<sup>b</sup>*Centre for Biological Control (CBC), Rhodes University, South Africa*

Corresponding Author: sfaris@icipe.org

Lettura tenuta durante la Tavola Rotonda “Biological pest control: managing multitrophic interactions for sustainable agriculture”. Seduta pubblica dell’Accademia – Firenze, 18 giugno 2022.

### *Recent advances in classical biological control of key horticulture pests: African perspective*

The spread and establishment of Alien invasive species (AIS) in new environments outside their native range are increasing worldwide at an unprecedented rate due to human activities and climate change. Once they arrive in new habitats, very often the population of AIS tend to multiply at exponential rate owing to several intertwined factors, key among them being the lack of efficient co-evolved natural enemies, thus posing a serious threat to fruit and vegetable production as well as biodiversity. This was the case with the oriental fruit fly, *Bactrocera dorsalis* and the tomato pinworm, *Phthorimaea (=Tuta) absoluta* in Africa which invaded the continent in 2003 and 2008, respectively. The invasion and spread of these two pests in Africa and beyond have led to massive economic losses due to direct damage to fruits and vegetables and as well as to quarantine restrictions of the African produce imposed by importing countries. To reunite these invaders with their respective natural enemies in Africa, classical biological program control against these pests were initiated. Two parasitoids *Fopius arisanus* and *Dia-chasmimorpha longicaudata* were imported from Hawaii for biological control of *B. dorsalis* in Africa, while *Dolichogenidea gelechiidivoris* was obtained from Peru targeting *T. absoluta*.

The pre-release evaluation of the introduced parasitoids against their respective target insect pest was undertaken under quarantine conditions and the interactions between these exotic parasitoids and the indigenous parasitoids and other biocontrol agents were assessed. Furthermore, suitable areas for the potential establishment of the three parasitoids were predicted under current and future climatic conditions using various modelling approaches to guide effective field releases of these natural enemies. Thereafter, parasitoids were released in the field to suppress the target pests. The performance of these parasitoids against their target host insect, the nature and multitude of the interaction with native parasitoid species as well as the suitable areas for their establishment under current and future scenario are discussed. The need for exploring the prospect of emerging invasive pest in the contestant is also highlighted.

KEY WORD: Invasive pest, classical biological control, climate change

### INTRODUCTION

The African horticultural subsector continues to face myriad of biotic stressors hindering its transformation and the realization of its full potential in food security for the African populace. Key among these biotic stressors is insect pests that impede this subsector from realizing its full potential. In addition to the indigenous pests, alien invasive species have further compounded the production and economic constraints facing the horticultural sector (MOHAMED *et al.*, 2008; EKESI *et al.*, 2011; GWOKYALYA *et al.*, 2022). The populations of the indigenous pests could be suppressed by their co-evolved natural enemies to below economic threshold. However, this is not the case for the alien invasive pests, because these pests invade new territories and spread without their co-evolved natural enemies; hence, the uncontrolled populations result into serious damages to the horticultural crops (MO-

HAMED *et al.*, 2016). Traditionally, the control of these pests involves indiscriminate and widespread application of synthetic chemicals. However, overreliance and excessive use of synthetic chemicals cause detrimental impact to One Health. Thus, Integrated Pest Management (IPM) strategies come in handy to offer eco-friendly and sustainable alternatives to manage the alien invasive pests. Of the numerous IPM strategies, classical biological control (CBC), which involves the introduction of co-evolved natural enemies of proven efficiency to the alien invasive pests into the invaded areas, have been employed in Africa (see MOHAMED *et al.*, 2022; MOHAMED *et al.*, 2016 and references therein). The International Centre for Insect Physiology and Ecology (*icipe*), as well as other research institutions have contributed immensely to the development and adoption of CBC of various horticultural pests such as *Bactrocera dorsalis* (Hendel) (Diptera: Tephritidae) and *Phthorimaea absoluta* (Mey-

rick) (Lepidoptera: Gelechiidae) among others. The outstanding achievements of using CBC in SSA's horticultural sector are presented.

#### INVASIVE FRUIT FLIES

Tephritids fruit fly pests are a major impediment to horticultural production in Africa. The problem is further compounded with invasion and wide spread of alien fruit flies. One of the most recent invaders which wreaked havoc in Africa, is the oriental fruit fly, *B. dorsalis* which was first recorded in Kenya in 2003 (LUX *et al.*, 2003; MOHAMED *et al.*, 2008; EKESI *et al.*, 2011). Since then, this pest has spread to almost all the African countries causing enormous socioeconomic losses estimated at \$2 billion annually (EKESI *et al.*, 2011).

Another, species which is threatening fruit production is the peach fruit fly, *Bactrocera zonata* (Saunders) (Diptera: Tephritidae). This pest so far has been recorded in Egypt, Sudan, Libya, Mauritius and La reunion (EPP0, 2010; MAHMOUD *et al.*, 2020; ZINGORE *et al.*, 2020; SALAH *et al.*, 2012) where it is the dominant pest among horticultural crops. Considering the availability of host plants across the country borders, the fragile phytosanitary infrastructure and ill trained personnel the pest represents an imminent threat to the fruit industry across the continent (NI *et al.*, 2012; ZINGORE *et al.*, 2020)

Despite a recent report by MAHMOUD *et al.*, (2020) that some native African parasitoids successfully parasitized *B. zonata*, the African continent has not been so resourceful in terms of parasitoid species potent enough for use as biological control agents of the invasive pests: earlier research reported zero adult parasitoid emergence of *P. cosyrae* and *Tetrastichus givardii* Silvestri (Hymenoptera: Eulophidae) reared on *B. dorsalis* despite the high host acceptability (MOHAMED *et al.*, 2003, 2006; NDLELA *et al.*, 2020; GWOKYALYA *et al.*, 2022). Consequently, efforts were channeled to importing co-evolved parasitoids of these pests from already established colonies outside Africa (MOHAMED *et al.*, 2008, 2010, 2016; NDIAYE *et al.*, 2015).

#### CLASSICAL BIOLOGICAL CONTROL OF INVASIVE FRUIT FLY PESTS

Owing to the devastating effects of these pests across Africa, exacerbated by, among other factors, the lack of efficient resident natural enemies, co-evolved parasitoid of these pests were imported and released into the African ecosystem for CBC of these pests (reviewed in MOHAMED *et al.*, 2016, 2022). These parasitoids include *Fopius arisanus* and *Diachasmimorpha longicaudata* targeting *B. dorsalis*. Prior to their release, these parasitoids were evaluated for their performance against the African population of *B. dorsalis* as well as other pestiferous flies native to Africa (MOHAMED *et al.*, 2008, 2010; NDIAYE *et al.*, 2015; NDLELA *et al.*, 2020). *Fopius arisanus* and *D. longicaudata* readily parasitized *B. dorsalis* as well as other native *Ceratitis* species, however, adult emergence

of both parasitoids was highly variable (MOHAMED *et al.*, 2008, 2010; NDLELA *et al.*, 2020; GWOKYALYA *et al.*, 2022).

Investigation of the factors responsible for the distinct variations in parasitoid virulence has revealed that host intrinsic factors are a major driver of host-parasitoid interactions. Recently, GWOKYALYA *et al.* (2022) demonstrated that differential host immune responses to parasitism is a key determinant of the outcome of host-parasitoid interactions. The authors further showed that parasitism by *D. longicaudata* led to lower total hemocyte and plasmacyte counts and reduced cell viability and cell spreading indices compared to parasitism by *P. cosyrae*. These changes in cellular immunity led to low melanotic encapsulation and correspondingly higher adult parasitoid emergence in *D. longicaudata* parasitised hosts compared to those parasitised by *P. cosyrae* where no adult emerged was recorded. Further investigation of the molecular drivers of these immune phenotypes revealed that defense against the native parasitoid, *P. cosyrae* is mediated by the Toll and immune deficiency immune pathways whereas *D. longicaudata* interferes with host cytoskeleton reorganization and inhibits the Janus kinase-signal transducer and activator of transcription and c-Jun N-terminal kinase pathways thereby suppressing host immune defences (GWOKYALYA *et al.* Unpublished)

On the other hand, host associated symbionts have been found to influence host-parasitoid interactions of *B. dorsalis*. *Lactococcus lactis*, a facultative symbiont of *B. dorsalis* increased parasitoid emergence whereas inoculation of *B. dorsalis* with *Providencia alcalifaciens* led to host protective phenotypes associated with improved fitness of the few successfully emerged adult parasitoids (GWOKYALYA *et al.*, 2023). These results shed light on the intricate mechanisms underpinning host-parasitoid interactions and present potential avenues for improving parasitoid efficacy, for example by using host-associated symbionts as probiotics to increase the number and fitness of parasitoids reared and released for CBC of invasive fruit fly pests. There is, however, dire need to investigate other aspects such as parasitoid associated-venoms, their evolutionary functions, and mechanism of action to better understand host-parasitoid evolutionary and functional ecology. This will guide pest-specific CBC programs for a more impactful outcome.

Using various modelling approaches, suitable areas for establishment of these parasitoids have been project for current and future climatic scenarios (NANGA NANGA *et al.*, 2021; NDLELA *et al.*, 2021). Based on the outstanding performance of *F. arisanus* and *D. longicaudata* against the target pest, *B. dorsalis* and guidance by the outcome of these projections of suitable areas of establishment, these parasitoids have been released in several African countries with very promising outcomes (MOHAMED *et al.*, 2016). For example, a recent study by AGBOKA *et al.* (2022a) which combined cellular automata and ecological niche models reported that *F. arisanus* has dispersed to cover an estimated area of 50.34 km<sup>2</sup> and 229.97 km<sup>2</sup> in Kenya and at the continental level, respec-

tively. In term of number of beneficiaries, the model estimated that 351,855 and 3,731,330 households in Kenya and across Africa, respectively, had benefited from *F. arisanus* releases.

Elsewhere in Africa, *Aganaspis daci* (Weld), *F. arisanus*, *Diachasmimorpha kraussii*, *Diachasmimorpha tryoni* (Cameron) (Hymenoptera: Braconidae) and *D. longicaudata* were imported to Egypt from Hawaii for the management of *B. zonata* (MOHAMED *et al.*, 2016). Of all these parasitoids, *A. daci* exhibited the highest adult emergence rate and was hence released in the field where post-release assessment revealed a 9.7% parasitism rate after one month. Additionally, *F. arisanus* was imported and released in La reunion and for CBC of *B. zonata* yielding high parasitism (>70%) (ROUSSE *et al.*, 2006).

#### INTERACTION OF THE INTRODUCED FRUIT FLY PARASITIDS WITH OTHER BIOCONTROL AGENTS

Once released in the field, the introduced parasitoid species are expected to interact with other natural enemies already in the system and those applied in the context of IPM. To understand the nature and the magnitude of these potential interactions, a couple of studies have been undertaken. For example, KARLSSON *et al.* (2018) investigated the interaction between the introduced parasitoid *F. arisanus* and its congeneric, *Fopius caudatus* (Szépligeti) (Hymenoptera: Braconidae) and demonstrated that the former is the best performing parasitoid. Likewise, *Diachasmimorpha longicaudata* outcompeted the native parasitoid, *Pystallia cosyrae* in all exposure scenarios (NDLELA *et al.*, 2020). Contrarily, MIGANI *et al.* (2017) showed that the presence of the predatory weaver ant reduces parasitism rates of *D. longicaudata* and *F. arisanus* on *B. dorsalis* by almost half, a phenomenon that could be attributed to the repellent effect of the semiochemicals produced by the weaver ant that reduce landing and patch residence time of the parasitoids (APPIAH *et al.*, 2014). On the other hand, the combined use of the entomopathogenic fungus, *Metarhizium anisopliae* (ICIPE, 69, ICIPE 62, ICIPE 18) with either *F. arisanus* or *D. longicaudata* had no effect on the parasitoids (MKIGA *et al.* unpublished).

#### CLASSICAL BIOLOGICAL CONTROL OF THE SOUTH AMERICAN TOMATO LEAFMINER, *PHTHORIMAEA ABSOLUTA* IN AFRICA

Following the transatlantic invasion and widespread of *Phthorimaea absoluta* in Africa, the pest continues to cause huge economic losses in tomato farming. In an attempt to identify indigenous parasitoids that could be able to form new associations with this pest, field surveys were undertaken in several countries, during which several parasitoids (IDRISS *et al.*, 2018; SEYDI *et al.*, 2021; MAMA SAMBO *et al.*, 2022a; KINYANJUI *et al.*, 2021) and predators (SAWADOGO *et al.*, 2022; KINYANJUI *et al.*, 2021) were reported to be associated with *P. absoluta*. Nevertheless, none of these natural enemies have

been able reduce the population of the pest below the economic injury level. This necessitated the exploration for and introduction of the pest's natural enemy from its aboriginal home, Peru. In this regard, the Microgastrins parasitoid, *Dolichogenidea gelechiidivoris* (Marsh) (Hymenoptera: Braconidae) was imported into Kenya for testing and subsequent field releases (AIGBEDION-ATALOR *et al.*, 2020). A host stage specificity test carried out under quarantine conditions at *icipi* showed that the parasitoid had a higher preference and better performance on the early larval instars of *P. absoluta* (AIGBEDION-ATALOR *et al.*, 2022). A follow up study by Mama Sambo *et al.* (2022b) established that the performance of the parasitoid on its host follows a type II functional response. In another arena, for exploring the use of semiochemical for enhancement of parasitoid performance, AYELO *et al.* (2021) demonstrated that *D. gelechiidivoris* was more attracted to volatiles of *P. absoluta*-infested compared to non-infested tomato plants, with the parasitoid preference increasing with increasing host density. The authors further illustrated that *D. gelechiidivoris* was attracted to larval frass volatiles and pheromones of *P. absoluta*, but not to larval odours.

Based on the outstanding laboratory performance of *D. gelechiidivoris*, *icipi* pioneered field releases of this parasitoid in Africa in 2020 (SHIRAKU, 2020); starting with East African countries i.e. Kenya, Uganda, and Ethiopia (MOHAMED *et al.*, 2022). In a follow up survey in Kenya the parasitoid has been recovered at a 4.4 Km from the initial release (MAMA SAMBO *et al.*, unpublished data). Moreover, prediction of the ecological niche showed that the bigger part of Africa is suitable for field deployment of *D. gelechiidivoris* against *P. absoluta* under current and future scenarios (AIGBEDION-ATALOR *et al.*, 2022). A similar scenario was predicted using spatio-temporal dispersion modelling across Kenya tomato growing areas (AGBOKA *et al.*, 2022b).

#### INTERACTION OF *D. GELECHIIDIVORIS* WITH OTHER BIOCONTROL AGENTS

In an interaction study between *D. gelechiidivoris* and the indigenous ectoparasitoid *Stenomiesius* sp near *japonicus*, *D. gelechiidivoris* laid more eggs and emerged more on first and second larval-stages than when the parasitoids was exposed to the host either simultaneously or sequentially (MAMA SAMBO *et al.*, 2022b). Also, AIGBEDION-ATALOR *et al.* (2021) reported that the performance of *D. gelechiidivoris* in terms of cocoon formation, adult emergence, and proportion of female progeny was not affected by the presence and density of *N. tenuis*. In the same study, the authors found that the combination of two *N. tenuis* and one female *D. gelechiidivoris* yielded up to 88% *P. absoluta* control.

In a separate study where the effect of *Metarhizium anisopliae* ICIPE 20 on *D. gelechiidivoris* adults was investigated, it was revealed that *M. anisopliae* negatively affects the longevity of the parasitoid. Although the infected adults parasitised up to 71% *P. absoluta* larvae in

comparison to 88% parasitism found when larvae were exposed to non-infected adults (MAMA SAMBO *et al.*, 2022a). In the same study, fungus-sprayed host plants and non-sprayed host plants were subjected to the parasitoid in both choice and non-choice assays and the highest parasitism rate was recorded on the non-sprayed plants under choice scenario. However, the effect of the biocontrol agent seems to be synergistic whereby significantly higher *P. absoluta* mortality (80%) was observed on host plants sprayed with *M. anisopliae* ICIPE 20 and exposed to *D. gelechiidivoris* compared to when each biocontrol agent was applied alone.

In a field trial, the combination of these biocontrol methods (*M. anisopliae* ICIPE 20 and *D. gelechiidivoris*) yielded up to 70% marketable tomato fruits compared to *Tuta* pheromone TUA-Optima® impregnated with *M. anisopliae* ICIPE 20 dry conidia (52% marketable tomato fruits) and *D. gelechiidivoris* alone (41% marketable tomato fruits) (MAMA SAMBO *et al.*, unpublished data).

#### OTHER INVASIVE HORTICULTURAL PESTS IN AFRICA

In addition to *B. dorsalis* and *T. absoluta*, there are new and emerging alien invasive/and or invasive pests, which are expanding their geographical range in the continent that can be controlled through CBC. These pests include the spotted wing drosophila (*Drosophila suzukii* Matsumura (Diptera: Drosophilidae), Asian citrus psyllid (*Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera: Liviidae), White mango scale *Aulacaspis tubercularis* (Hemiptera: Diaspididae); Japanese dodder, *Cuscuta japonica* (Solanales: Cuscutaceae), as well as the Potato Cyst Nematodes (PCN), *Globodera* spp. Also, the Papaya mealybug (*Paracoccus marginatus* Williams and Granara de Willink (Hemiptera: Pseudococcidae) and mango mealybug (*Rastrococcus iceryoides* Green (Hemiptera: Pseudococcidae) are spreading to other part of the continent.

#### CONCLUDING REMARKS

Although there is substantial progress made in terms of CBC in Africa, there are still constraints hindering the implementation of this approach. Few among them being lack of awareness among the stakeholders, inadequacy of financial resources for CBC as well as lack of enabling policies and unharmonized policy for import and releases of natural enemies across the continent. A concerted effort among the various stakeholder is need to overcome these challenges.

#### ACKNOWLEDGMENTS

This work received financial support from the German Federal Ministry for Economic Cooperation and Development (BMZ) commissioned and administered through the Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) Fund for International Agricultural Research (FIA) for various projects (grant numbers: 81132021 ; 81157481; 81250394); the International De-

velopment Research Centre (IDRC) and the Australian Centre for International Agricultural Research (ACIAR) for the project “Alien invasive fruit flies in Southern Africa: Implementation of a sustainable IPM programme to combat their menaces (grant number 109040)”; the Biovision Foundation Tuta IPM project (project ID: BV DPP-012/2019-2021); the Norwegian Agency for Development Cooperation, the section for research, innovation and higher education (grant number: RAF-3058 KEN-18/0005). The authors also gratefully acknowledge the *icipe* core funding organizations and agencies and agencies: the Swedish International Development Cooperation Agency (Sida); the Swiss Agency for Development and Cooperation (SDC); the Australian Centre for International Agricultural Research (ACIAR); the Federal Democratic Republic of Ethiopia; and the Government of the Republic of Kenya. The views expressed herein do not necessarily reflect the official opinion of the donors.”

#### REFERENCES

- AGBOKA K.M., TONNANG H.E.Z., ABDEL-RAHMAN E.M., KIMATHI E., MUTANGA O., ODINDI J., *et al.*, 2022 a - *A systematic methodological approach to estimate the impacts of a classical biological control agent's dispersal at landscape: Application to fruit fly Bactrocera dorsalis and its endoparasitoid Fopius arisanus*. *Biol. - Control*, 175; 105053. doi:10.1016/J.BIOCONTROL.2022.105053.
- AGBOKA K.M., TONNANG H.E.Z., ABDEL-RAHMAN E.M., ODINDI J., MUTANGA O., MOHAMED S.A. - 2022 b - *A Fuzzy-Based Model to Predict the Spatio-Temporal Performance of the Dolichogenidea gelechiidivoris Natural Enemy against Tuta absoluta under Climate Change*. - *Biology (Basel)*, 11: 1280. doi:https://doi.org/10.3390/biology11091280.
- AIGBEDION-ATALOR P.O., ABUELGASIM S., HILL M.P., ZALUCKI M.P., AZRAG A.G.A., SRINIVASAN R., *et al.*, 2020 - *Host stage preference and performance of Dolichogenidea gelechiidivoris (Hymenoptera: Braconidae), a candidate for classical biological control of Tuta absoluta in Africa*. - *Biol. Control*, 144: 104215. doi:10.1016/j.biocontrol.2020.104215.
- AIGBEDION-ATALOR P.O., HILL M.P., AYELO P.M., NDLELA S., ZALUCKI M.P., MOHAMED S.A., 2021 - *Can the combined use of the mirid predator Nesidioris tenuis and a braconid larval endoparasitoid Dolichogenidea gelechiidivoris improve the biological control of Tuta absoluta?* - *Insects*, 12: 1004. doi:10.3390/insects12111004.
- AIGBEDION-ATALOR P.O., HILL M.P., AZRAG A.G.A., ZALUCKI M.P., MOHAMED S.A., 2022 - *Disentangling thermal effects using life cycle simulation modelling on the biology and demographic parameters of Dolichogenidea gelechiidivoris, a parasitoid of Tuta absoluta*. - *J. Therm. Biol.*, 107: 103260. doi:10.1016/j.jtherbio.2022.103260.
- APIIAH E.F., EKESI S., AFREH-NUAMAH K., OBENG-OFORI D., MOHAMED S.A., 2014 - *African weaver ant-pro-*

- duced semiochemicals impact on foraging behaviour and parasitism by the Opiine parasitoid, *Fopius arisanus* on *Bactrocera invadens* (Diptera: Tephritidae). - *Biol. Control*, 79: 49–57. doi:10.1016/J.BIOCONTROL.2014.08.004.
- AYELO P.M., MOHAMED S.A., CHAILLEUX A., YUSUF A.A., PIRK C.W.W., DELETRE E., 2021 - *The parasitoid Dolichogenidea gelechiidivoris* eavesdrops on semiochemicals from its host *Tuta absoluta* and tomato. - *J. Pest Sci.*, 2004, 95: 633–652. doi:https://doi.org/10.1007/s10340-021-01424-w.
- EKESI S., CHABI-OLAYE A., SUBRAMANIAN S., BORGE-MEISTER C., 2011 - *Horticultural pest management and the African economy: Successes, challenges and opportunities in a changing global environment*. - *Acta Hort.*, 911: 165–183. doi:10.17660/ActaHortic.2011.911.17.
- EPPO, 2010 - *Bactrocera zonata: procedure for official control*. - *EPPO Bull.*, 40:390–5. https://doi.org/10.1111/j.1365-2338.2010.02421.x.
- GWOKYALYA R., HERREN J. K., NDLELA S., MOHAMED S.A., - *Comparative transcriptomic and proteomics reveals defence and susceptible mechanisms of Bactrocera dorsalis against parasitoid wasps*. -Unpublished.
- GWOKYALYA R., HERREN J.K., WELDON C.W., KHAMIS F.M., NDLELA S., MOHAMED S.A., 2022 - *Differential immune responses in new and old fruit fly-parasitoid associations: Implications for their management*. - *Front. Physiol.*, 13: 1663. doi:10.3389/FPHYS.2022.945370/BIBTEX.
- GWOKYALYA R., WELDON C.W., HERREN J.K., GICHUHI J., MAKHULU E.E., NDLELA S., MOHAMED S.A., 2023 – *Friend or Foe: Symbiotic Bacteria in Bactrocera dorsalis*. – *Parasitoids Associations Biology*, 12 (2): 274.
- IDRISS G.E.A., MOHAMED S.A., KHAMIS F., DU PLESSIS H., EKESI S., 2018 - *Biology and performance of two indigenous larval parasitoids on Tuta absoluta (Lepidoptera: Gelechiidae) in Sudan*. - https://doi.org/10.1080/09583157.2018.1477117 28, 614–628. doi:10.1080/09583157.2018.1477117.
- KARLSSON M.F., DE SOUZA E.O., AYELO P.M., ZANNOU J.A., MÉGNIGBÉTO G.S.B., BOKONON-GANTA A.H., 2018 - *Interspecific competition between egg parasitoids: Native Fopius caudatus and exotic Fopius arisanus, in Ceratitis cosyra*. - *Biol. Control*, 117: 172–181. doi:10.1016/j.biocontrol.2017.11.010.
- LUX S.A., COPELAND R.S., WHITE I.M., MANRAKHAN A., BILLAH M.K., 2003 - *A New Invasive Fruit Fly Species from the Bactrocera dorsalis (Hendel) Group Detected in East Africa*. - *Int. J. Trop. Insect Sci.*, 23: 355–361. doi:10.1017/S174275840001242X.
- MAHMOUD M.E.E., MOHAMED S.A., NDLELA S., AZRAG A.G.A., KHAMIS F.M., BASHIR M.A.E., et al., 2020 - *Distribution, relative abundance, and level of infestation of the invasive peach fruit fly Bactrocera zonata (Saunders) (Diptera: Tephritidae) and its associated natural enemies in Sudan*. - *Phytoparasitica*, 48: 589–605. doi:10.1007/S12600-020-00829-0.
- MAMA SAMBO S., AKUTSE K.S., PLESSIS H., OSA P., ATALOR A., MOHAMED S.A., et al., 2022 a - *Interactions between the Entomopathogenic Fungus Metarhizium anisopliae ICIPE 20 and the Endoparasitoid Dolichogenidea gelechiidivoris, and Implications for Combined Biocontrol of Tuta absoluta*. - *Biology (Basel)*, 11: 1323. doi:https://doi.org/10.3390/biology11091323.
- MAMA SAMBO S., NDLELA S., AZRAG A.G.A., DU PLESSIS H., MOHAMED S.A., 2022 b - *Interaction between Two Parasitoids of Tuta absoluta: The Introduced Dolichogenidea gelechiidivoris and the Indigenous Stenomesus sp. near Japonicus*. - *SSRN Electron. J.* doi:10.2139/SSRN.4213078.
- MAMA SAMBO S., NDLELA S., DU PLESSIS H., OBALA F., MOHAMED S.A., 2022 c - *Ratio dependence effects of the parasitoid Dolichogenidea gelechiidivoris on its associated host Tuta absoluta*. - *Biocontrol Sci. Technol.*, 32: 497–510. doi:10.1080/09583157.2022.2033702.
- MIGANI V., EKESI S., MERKEL K., HOFFMEISTER T., 2017 - *At Lunch with a Killer: The Effect of Weaver Ants on Host-Parasitoid Interactions on Mango*. - *PLoS One*, 12: e0170101. doi:10.1371/JOURNAL.PONE.0170101.
- MOHAMED S. ., DUBOIS T., AZRAG A.G., NDLELA S., NEUENSCHWANDER P., 2022 - *Classical biological of key horticultural pests in Africa: successes, challenges, and opportunities*. - *Curr. Opin. Insect Sci.*, 53: 100945. doi:10.1016/J.COIS.2022.100945.
- MOHAMED S.A., EKESI S., HANNA R., 2008 - *Evaluation of the impact of Diachasmimorpha longicaudata on Bactrocera invadens and five African fruit fly species*. - *J. Appl. Entomol.*, 132: 789–797. doi:10.1111/J.1439-0418.2008.01350.X.
- MOHAMED S.A., EKESI S., HANNA R., 2010 - *Old and new host-parasitoid associations: Parasitism of the invasive fruit fly Bactrocera invadens (Diptera: Tephritidae) and five African fruit fly species by Fopius arisanus, an Asian opiine parasitoid*. - *Biocontrol Sci. Technol.*, 2: 183–196. doi:10.1080/09583150903447794.
- MOHAMED S.A., OVERHOLT W.A., WHARTON R.A., LUX S.A., ELTOUM E.M., 2003 - *Host specificity of Psytalia cosyrae (Hymenoptera: Braconidae) and the effect of different host species on parasitoid fitness*. - *Biol. Control*, 28: 155–163. doi:10.1016/S1049-9644(03)00099-9.
- MOHAMED S.A., RAMADAN M.M., EKESI S., 2016 - *In and out of Africa: Parasitoids used for biological control of fruit flies*. In: S. Ekesi et al. (eds.), *Fruit Fly Research and Development in Africa - Towards a Sustainable Management Strategy to Improve Horticulture* (Springer International Publishing), 325–368. doi:10.1007/978-3-319-43226-7\_16.
- MOHAMED S.A., WHARTON R.A., MÉREY G. VON, SCHULTHESS F., 2006 - *Acceptance and suitability of different host stages of Ceratitis capitata (Wiedemann) (Diptera: Tephritidae) and seven other tephritid fruit fly species to Tetrastichus giffardii Silvestri (Hymenoptera: Eulophidae)*. - *Biol. Control*, 39: 262–271.

- doi:10.1016/J.BIOCONTROL.2006.08.016.
- NANGA NANGA S., KEKEUNOU S., FOTSO KUATE A., FIABOE K.K.M., DONGMO KENFAK M.A., TONNANG H.E., *et al.*, 2021 - *Temperature-dependent phenology of the parasitoid Fopius arisanus on the host Bactrocera dorsalis*. - *J. Therm. Biol.*, 100: 103031. doi:10.1016/J.JTHERBIO.2021.103031.
- NDIAYE O., NDIAYE S., DJIBA S., BA C.T., VAUGHAN L., REY J.-Y., *et al.*, 2015 - *Preliminary surveys after release of the fruit fly parasitoid Fopius arisanus Sonan (Hymenoptera Braconidae) in mango production systems in Casamance (Senegal)*. - *Fruits*, 70: 91–99. doi:10.1051/fruits/2015001.
- NDLELA S., AZRAG A.G.A., MOHAMED S.A., 2021 - *Determination of temperature thresholds for the parasitoid Diachasmimorpha longicaudata (Hymenoptera: Braconidae), using life cycle simulation modeling: Implications for effective field releases in classical biological control of fruit flies*. - *PLoS One*, 16. doi:10.1371/JOURNAL.PONE.0255582.
- NDLELA S., MOHAMED S.A., AZRAG A.G.A., NDEGWA P.N., ONG'AMO G. , EKESI S., 2020 - *Interactions between two parasitoids of tephritidae: Diachasmimorpha longicaudata (ashmead) and Psytalia cosyrae (wilkinson) (hymenoptera: Braconidae), under laboratory conditions*. - *Insects*, 11: 1–16. doi:10.3390/insects11100671.
- NI W.L., LI Z.H., CHEN H.J., WAN F.H., QU W.W., ZHANG Z., *et al.*, 2012 - *Including climate change in pest risk assessment: the peach fruit fly, Bactrocera zonata (Diptera: Tephritidae)*. - *Bull. Entomol. Res.*, 102: 173–183. doi:10.1017/S0007485311000538.
- ROUSSE P., GOURDON F., QUILICI S., 2006 - *Host specificity of the egg pupal parasitoid Fopius arisanus (Hymenoptera: Braconidae) in La Reunion*. - *Biol. Control*, 37: 284–290. doi:10.1016/j.biocontrol.2005.12.008.
- SALAH F.E.E, ABDELGADER H., DE VILLIERS M., 2012 - *The occurrence of the peach fruit fly, Bactrocera zonata (Saunders)(Tephritidae) in Sudan*. 3–6th July 2012. TEAM 2nd Int. Meet. Biol. invasions Tephritidae Ecol. Econ. impacts, Kolymbari, Crete, Greece; 2012, p. 128.
- SAMBO S. ., NDLLELA S., PLESSIS H. DU, AKUTSE K.S., MOHAMED S.A. - *Performance of Dolichogenidea gelechiidivoris in combination with Metarhizium anisopliae against Phthorimaea absoluta under greenhouse conditions and its dispersion in open-field tomato in central Kenya*. Unpublished data.
- SAWADOGO M.W., MANO E., AHISSOU B.R., SOMDA I., NACRO S., LEGRÈVE A., *et al.*, 2022 - *Nesidiocoris tenuis in Burkina Faso: Distribution, predatory capacity and insecticide sensibility*. - *Physiol. Entomol.*, 47: 201–208. doi:10.1111/PHEN.12389.
- SEYDI O., SYLLA S., DIATTE M., LABOU B., DIARRA K., 2021 - *Recruitment of native parasitoids of the tomato leaf miner Tuta absoluta (Meyrick 1917), (Lepidoptera: Gelechiidae) in Senegal*. - <https://doi.org/10.1080/09670874.2021.1943047>. doi:10.1080/09670874.2021.1943047.
- SHIRAKU H., 2020 - *ICIPE Makes the first release of parasitoids into the farm in fight against Tuta absoluta*. - *Infonet-Biovision*. doi:<https://infonet-biovision.org/News/ICIPE-Makes-first-release-parasitoids-farm-fight-against-Tuta-Absoluta>.
- ZINGORE K.M., SITHOLE G., ABDEL-RAHMAN E.M., MOHAMED S.A., EKESI S., TANGA C.M., *et al.*, 2020 - *Global risk of invasion by Bactrocera zonata. Implications on horticultural crop production under changing climatic conditions*. - *PLoS One*, 15: e0243047. doi:10.1371/JOURNAL.PONE.0243047.

## CLASSICAL AND FORTUITOUS BIOLOGICAL CONTROL

LUCIANA TAVELLA <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Dipartimento di Scienze Agrarie, Forestali e Alimentari, Università degli Studi di Torino, Largo P. Braccini 2, 10095 Grugliasco (TO), Italy. E-mail: luciana.tavella@unito.it

Sintesi della lettura tenuta durante la Tavola Rotonda “Biological pest control: managing multitrophic interactions for sustainable agriculture”. Seduta pubblica dell’Accademia, Firenze, 10 giugno 2022.

With increasing global trade and travel, the introduction of harmful exotic insects is an increasingly pressing threat to agricultural production. If in newly colonised areas they find a wide availability of host plants and favourable environmental conditions, and in the absence of natural enemies capable of containing them, the new pests become established and give rise to huge infestations with serious economic and ecological repercussions. In invaded areas, the indigenous natural enemy complex is hardly able to adapt to the new insects, with the exception of generalist predators and parasitoids. Even, in the absence of co-evolved and specialist natural enemies, some of these generalist predators and parasitoids can be mass reared and used for augmentative biological control. Examples are the releases of the predatory bugs *Macrolophus pygmaeus* (Rambur) and *Nesidiocoris tenuis* (Reuter) against the tomato borer *Phthorimaea absoluta* Meyrick (YAO *et al.*, 2022), the egg parasitoid *Anastatus bifasciatus* (Geoffroy) against the brown marmorated stink bug *Halyomorpha halys* (Stål) (IACOVONE *et al.*, 2022), and the pupal parasitoid *Trichopria drosophilae* (Perkins) against the spotted wing drosophila *Drosophila suzukii* (Matsumura) (ROSSI STACCONI *et al.*, 2019).

However, the activity of generalist predators and parasitoids is often not effective enough for satisfactory control of the exotic insects, and the new successful associations between indigenous natural enemies and exotic pests are few. Worthy of note in this context is the case of the eulophids *Diglyphus isaea* (Walker) and *Necremnus tutae* Ribes & Bernardo, ectoparasitoids of leaf miner larvae. The latter species, of Palaearctic origin, was only described following the introduction of *Pht. absoluta*, as it has shifted from its primary hosts, which are not yet fully known, to the exotic host, thanks to the numerous studies aimed at its control carried out in invaded areas (GEBIOLA *et al.*, 2015). As a result, intensive and repeated use of broad-spectrum insecticides is resorted to for the control of the new pests, which not only nullifies the integrated pest management programmes widely adopted today, but also have heavy side effects on human health, environment, and biodiversity. Alternatively, classical biological control, through the deliberate introduction of a natural enemy co-evolved with the exotic pest, is a powerful and lasting containment tool that can restore the natural balance present in the native range. Classical

biological control is therefore a central component in the long-term suppression of pest species.

Classical biological control dates in the late 19<sup>th</sup> century with the introduction of the vedalia beetle *Rodolia cardinalis* (Mulsant) to control the cottony cushion scale *Icerya purchasi* Maskall in California. Since then, classical biological control has targeted hundreds of invasive insects, leading to the long-term suppression of several species (COCK *et al.*, 2016; HEIMPEL & COCK, 2018). In Italy, after the introduction of *R. cardinalis* by Antonio Berlese in 1901, several other natural enemies were successfully released prior to Presidential Decree (DPR) No. 120 of March 12, 2003. For example, programmes conducted by researchers at the University of Turin include the introduction of the two egg parasitoids *Polynema striaticorne* Girault against the buffalo treehopper *Stictocephala bisonia* Kopp & Yonke in 1968, and *Anaphes nitens* (Girault) against the eucalyptus weevil *Gonipterus scutellatus* Gyllenhal in 1978 (ARZONE, 1994), up to the more recent introduction of *Torymus sinensis* Kamijo against the chestnut gall wasp *Dryocosmus kuriphilus* Yasumatsu in 2003 (Fig. 1). Native to China, *D. kuriphilus* was first reported in Italy in 2002 and has rapidly spread throughout Europe, causing severe damage to chestnut production and generally compromising plant health. Although some indigenous parasitoids are capable of attacking the exotic host, their activity has proved inadequate to contain infestations, as has chemical control, which is not always feasible and, in any case, not decisive. Therefore, based on the experience already gained in other invasion areas, *T. sinensis* was introduced, which effectively reduced *D. kuriphilus* populations, re-establishing the natural balance, as shown by data collected years after the biological control programme was initiated (AVTZIS *et al.*, 2019; FERRACINI *et al.*, 2019) (Fig. 2).

Sometimes natural enemies can follow their prey or host, and adventive populations of such exotic natural enemies can be found in areas of new colonisation of the pest, resulting in fortuitous biological control. Again, there is no shortage of examples in our territory, from the discovery of the tachinid fly *Trichopoda pennipes* (F.) against the green stink bug *Nezara viridula* (L.) in 1988 (SALERNO *et al.*, 2002) to the discovery of the encyrtid wasp *Psyllaephagus bliteus* Riek against the redgum lerp psyllid *Glycaspis brimblecombei* Moore in



Fig. 1 - Release of *Torymus sinensis* on galls of *Dryocosmus kuriphilus* (left), and a parasitoid female laying the egg into the cynipid gall (right).

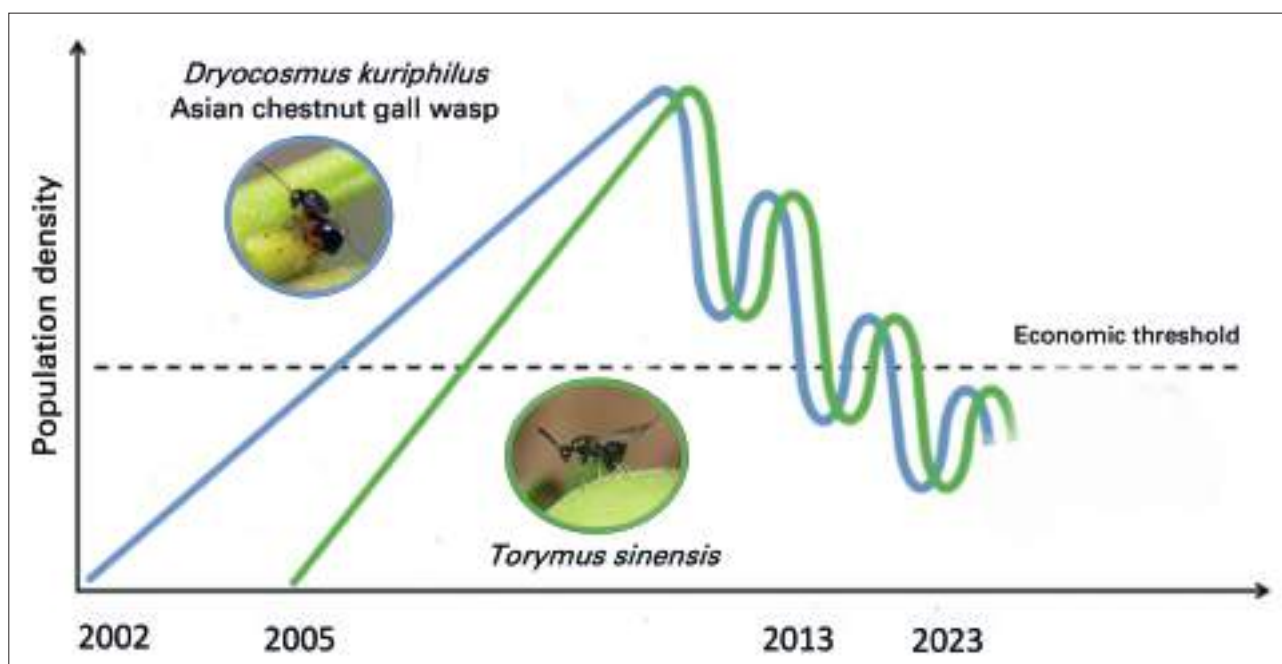


Fig. 2 - Population dynamics of the chestnut gall wasp *Dryocosmus kuriphilus* and its parasitoid *Torymus sinensis* following classical biological control programme in the invaded areas.

2011 (CALECA *et al.*, 2011). Paradigmatic is the case of two Nearctic insect species infesting black locust trees, accidentally introduced into Europe, whose parasitoids from the same area were described for the first time in the newly colonised area, namely *Achrysocharoides robiniae* sp. nov. against the leaf miner *Phyllonorycter robiniiellus* (Clemens) (HANSSON & SHEVTSOVA, 2010) and *Platygaster robiniae* sp. nov. against the gall midge *Obo-lodiplosis robiniae* (Haldeman) (BUHL & DUSO, 2008). Of recent interest is the rapid spread in Europe of the scelionid wasps *Trissolcus japonicus* (Ashmead) (Fig. 3) and *T. mitsukurii* (Ashmead), effective egg parasitoids of *H. halys* in the native range, starting with the first reports in Switzerland in 2017 and Italy in 2018, respectively

(SABBATINI PEVERIERI *et al.*, 2018; STAHL *et al.*, 2019; MORAGLIO *et al.*, 2020). Since then, findings of the two species have been rapidly increasing in several European countries (Fig. 4). Also, in the case of *D. suzukii*, during research aimed at identifying indigenous parasitoids capable of adapting to the exotic host, from which only generalist pupal parasitoids initially emerged (MAZZETTO *et al.*, 2016), recently an exotic larval parasitoid, *Lep-topilina japonica* Novković & Kimura, was obtained and is rapidly spreading in Italy (PUPPATO *et al.*, 2020).

Since the late 19<sup>th</sup> century, several classical biological control programmes have been implemented worldwide, and more than 6,000 introductions of more than 2,000 biological control agents have been carried out to





Fig. 3 - Adults of *Trissolcus japonicus*, *T. mitsukurii*, and *Acroclisoides sinicus* emerging from an egg mass of *Halyomorpha halys* (left), and *T. japonicus* female laying the egg into *H. halys* eggs (right).

contain insect pests, achieving a permanent reduction of over 170 noxious species (COCK *et al.*, 2016). Despite many successes, however, not all introductions have been equally successful, especially in the past. In some cases, natural enemies did not become established or became established but did not effectively contain the target pest, or even in a small percentage proved ecologically damaging, leading to significant side effects (VAN LENTEREN *et al.*, 2006). Thus, classical biological control has produced important environmental benefits, but it has also introduced ecological risks that, over the past two

decades, have prompted researchers to conduct thorough analyses and develop risk assessment protocols in an effort to make introductions ecologically safer (BARRATT *et al.*, 2010; HEIMPEL & COCK, 2018). In many countries, regulatory requirements have become more restrictive, and approval for the release of an exotic predator or parasitoid is based on a thorough risk assessment, which provides information on its biology, ecology, and range of distribution, and estimates the likelihood and magnitude of adverse effects, such as reduction in biodiversity, reduction in non-target populations, interference with the



Fig. 4 - Record of adventive populations of *Trissolcus japonicus* and *T. mitsukurii* in Europe; <sup>(1)</sup> STAHL *et al.* (2019), <sup>(2)</sup> SABBATINI PEVERIERI *et al.* (2019), <sup>(3)</sup> MORAGLIO *et al.* (2020), <sup>(4)</sup> SCACCINI *et al.* (2020), <sup>(5)</sup> BOUT *et al.* (2021), <sup>(6)</sup> DIECKHOFF *et al.* (2021), <sup>(7)</sup> ROT *et al.* (2021).

activity of indigenous natural enemies, that could occur as a result of release (HAYE *et al.*, 2020).

In Italy, classical biological control has been suspended for more than 15 years. In fact, DPR No. 120 of March 12, 2003 banned any introduction of non-native species and populations, effectively preventing any biological control projects against exotic pests. As a result of the growing threat posed by some exotic pests, and in particular by *H. halys*, in recent years the situation has been unblocked, the current legislation has been amended (DPR No. 102 of July 5, 2019), bringing it moreover in line with what was already provided for in the relevant EU legislation, which covered the specific case of the introduction of allochthonous organisms for biological control. Moreover, the recent issuance of the Ministerial Decree of April 2, 2020 “Criteria for the reintroduction and repopulation of native species and for the introduction of non-native species and populations” allows an official application for the release of a biological control agent against an exotic pest.

Therefore, classical biological control has again become a viable option for the containment of exotic pest populations, obviously after thorough risk assessment studies to avoid adverse consequences. In Italy, national biological control projects are currently being implemented against *H. halys* using the egg parasitoid *T. japonicus* and against *D. suzukii* using the larval parasitoid *Ganaspis brasiliensis* (Ihering), initiated after extensive risk assessment studies on non-target organisms (HAYE *et al.*, 2020; BIONDI *et al.*, 2021; SABBATINI PEVERIERI *et al.*, 2021). Further investigations should be conducted in the coming years to verify the impact of the introduction of these biological control agents, comparing it with the impact of repeated broad-spectrum insecticide treatments applied against invasive exotic pests. In conclusion, because the benefit-risk analysis of classical biological control has shown that there were very few negative cases, and because, due to increased awareness, the safety of biological control releases has been greatly improved, based on past experience, a new era should be opened in which the benefits and risks are clearly and explicitly balanced to maximize the benefits and minimize the risks (HEIMPEL & COCK, 2018).

#### BIBLIOGRAFIA

- ARZONE A., 1994 – *Carlo Vidano entomologo*. – Mem. Soc. Ent. ital., 72: 3-24.
- AVTZIS D. N., MELIKA G., MATOŠEVIĆ D., COYLE D. R., 2019 – *The Asian chestnut gall wasp Dryocosmus kuriphilus: a global invader and a successful case of classical biological control*. – J. Pest Sci., 92: 107–115.
- BARRATT B. I. P., HOWARTH F. G., WITHERS T. M., KEAN J. M., RIDLEY G. S., 2010 – *Progress in risk assessment for classical biological control*. – Biol. Control, 52: 245–254.
- BIONDI A., WANG X., DAANE K. M., 2021 – *Host preference of three Asian larval parasitoids to closely related Drosophila species: implications for biological control of Drosophila suzukii*. – J. Pest Sci., 94: 273–283.
- BOUT A., TORTORICI F., HAMIDI R., WAROT S., TAVELLA L., THOMAS M., 2021 – *First detection of the adventive egg parasitoid of Halyomorpha halys (Stål) (Hemiptera: Pentatomidae) Trissolcus mitsukurii (Ashmead) (Hymenoptera: Scelionidae) in France*. – Insects, 12 (9): 761.
- BUHL P. N., DUSO C., 2008 – *Platygaster robiniae n. sp. (Hymenoptera: Platygasteridae) parasitoid of Obolodiplosis robiniae (Diptera: Cecidomyiidae) in Europe*. – Ann. Entomol. Soc. Am., 101: 297-300.
- CALECA V., LO VERDE G. MALTESE M., 2011 – *First record in Italy of Psyllaephagus bliteus Riek (Hymenoptera Encyrtidae) parasitoid of Glycaspis brimblecombei Moore (Hemiptera Psyllidae)*. – Natural sicil., S. IV, 35: 435-444.
- COCK M. J. W., MURPHY S. T., KAIRO M. T. K., THOMPSON E., MURPHY R. J., FRANCIS A. W., 2016 – *Trends in the classical biological control of insect pests by insects: an update of the BIOCAT database*. – BioControl, 61: 349–363.
- DIECKHOFF C., WENZ S., RENNINGER M., REISSIG A., RAULEDER H., ZEBITZ C. P. W., REETZ J., ZIMMERMANN O., 2021 – *Add Germany to the list—Adventive population of Trissolcus japonicus (Ashmead) (Hymenoptera: Scelionidae) emerges in Germany*. – Insects, 12, 414.
- FERRACINI C., FERRARI E., PONTINI M., SALADINI M.A., ALMA A., 2019. – *Effectiveness of Torymus sinensis: a successful long-term control of the Asian chestnut gall wasp in Italy*. – J. Pest Sci., 92(1): 353-359.
- GEBIOLA M., BERNARDO U., RIBES A., GIBSON G. A. P., 2015 – *An integrative study of Necremnus Thomson (Hymenoptera: Eulophidae) associated with invasive pests in Europe and North America: taxonomic and ecological implications*. – Zool. J. Linn. Soc., 173(2): 352–423.
- HANSSON C., SHEVTSOVA E., 2010 – *Three new species of Achrysocharoides Girault (Hymenoptera: Eulophidae) parasitoids of Phyllonorycter spp. (Lepidoptera: Gracillariidae) on Acer platanoides and Robinia pseudoacacia*. – Zootaxa, 2388: 23–43.
- HAYE T., MORAGLIO S. T., STAHL J. M., VISENTIN S., GREGORIO T., TAVELLA L., 2020 – *Fundamental host range of Trissolcus japonicus in Europe*. – J. Pest Sci., 93: 171–182.
- HEIMPEL G. E., COCK M. J. W., 2018 – *Shifting paradigms in the history of classical biological control*. – BioControl, 63: 27–37.
- IACOVONE A., MASETTI A., MOSTI M., CONTI E., BURGIO G., 2022 – *Augmentative biological control of Halyomorpha halys using the native European parasitoid Anastatus bifasciatus: Efficacy and ecological impact*. – Biological Control, 172: 104973.
- MAZZETTO F., MARCHETTI E., AMIRESMAEILI N., SACCO D., FRANCATI S., JUCKER C., DINDO M. L., LUPI D., TAVELLA L., 2016 – *Drosophila parasitoids in northern Italy*

- and their potential to attack the exotic pest *Drosophila suzukii*. – *J. Pest Sci.*, 89: 837–850.
- MORAGLIO S. T., TORTORICI F., PANSA M. G., CASTELLI G., PONTINI M., SCOVERO S., VISENTIN S., TAVELLA L., 2020 – A 3-year survey on parasitism of *Halyomorpha halys* by egg parasitoids in northern Italy. – *J. Pest Sci.*, 93: 183–194.
- PUPPATO S., GRASSI A., PEDRAZZOLI F., DE CRISTOFARO A., IORIATTI C., 2020 – First report of *Leptopilina japonica* in Europe. – *Insects*, 11(9): 611.
- ROSSI STACCONI, M.V., GRASSI, A., IORIATTI, C., ANFORA, G., 2019 – Augmentative releases of *Trichopria drosophilae* for the suppression of early season *Drosophila suzukii* populations. – *BioControl*, 64: 9–19.
- ROT MOJCA, MAISTRELLO L., COSTI E., BERNARDINELLI I., MALOSSINI G., BENVENUTO L., TRDAN S., 2021 – Native and non-native egg parasitoids associated with brown marmorated stink bug (*Halyomorpha halys* [Stål, 1855]; Hemiptera: Pentatomidae) in western Slovenia. – *Insects*, 12: 505.
- SABBATINI PEVERIERI G., TALAMAS E., BON M. C., MARIANELLI L., BERNARDINELLI I., MALOSSINI G., BENVENUTO L., ROVERSI P. F., HOELMER K., 2018 – Two Asian egg parasitoids of *Halyomorpha halys* (Stål) (Hemiptera, Pentatomidae) emerge in northern Italy: *Trissolcus mitsukurii* (Ashmead) and *Trissolcus japonicus* (Ashmead) (Hymenoptera, Scelionidae). – *J. Hymenopt. Res.*, 67: 37–53.
- SABBATINI PEVERIERI G., BONCOMPAGNI L., MAZZA G., PAOLI F., DAPPORTO L., GIOVANNINI L., MARIANELLI L., HOELMER K. A., ROVERSI P. F., 2021 – Combining physiological host range, behavior and host characteristics for predictive risk analysis of *Trissolcus japonicus*. – *J. Pest Sci.*, 94: 1003–1016.
- SALERNO G., COLAZZA S., BIN F., 2002 – *Nezara viridula* parasitism by the tachinid fly *Trichopoda pennipes* ten years after its accidental introduction into Italy from the New World. – *BioControl*, 47: 617–624.
- SCACCINI D., FALAGIARDA M., TORTORICI F., MARTINEZ-SANUDO I., TIRELLO P., REYES-DOMÍNGUEZ Y., GALLMETZER A., TAVELLA L., ZANDIGIACOMO P., DUSO C., POZZEBON A., 2020 – An insight into the role of *Trissolcus mitsukurii* as biological control agent of *Halyomorpha halys* in Northeastern Italy. – *Insects*, 11 (5): 306.
- STAHL J. M., TORTORICI F., PONTINI M., BON M. C., HOELMER K. A., MARAZZI C., TAVELLA L., HAYE T., 2019 – First discovery of adventive populations of *Trissolcus japonicus* in Europe. – *J. Pest Sci.*, 92: 371–379.
- VAN LENTEREN J. C., BALE J., BIGLER F., HOKKANEN H. M. T., LOOMANS A. J. M., 2006 – Assessing risks of releasing exotic biological control agents of arthropod pests. – *Annu. Rev. Entomol.*, 51: 609–634.
- YAO, F.-L., MONTICELLI, L.S., BOLL, R., KONAN K. A. J., THOMINE E., SCALA M., BEAREZ P., QU Y., BIONDI, A., DESNEUX, N., 2022 – Combining mirid predators to reduce crop damage and sustain biocontrol in multi-prey systems. – *J. Pest Sci.*, 95: 1645–1657.



## LANDSCAPE-SCALE MANAGEMENT OF NATURAL ENEMIES OF AGRICULTURAL PESTS

LORENZO MARINI <sup>a</sup>

<sup>a</sup> DAFNAE, University of Padova, Viale dell'Università 16, 35020 Legnaro, Padova, Italy; E-mail: lorenzo.marini@unipd.it

Lettura tenuta durante la Tavola Rotonda “Biological pest control: managing multitrophic interactions for sustainable agriculture”. Seduta pubblica dell'Accademia – Firenze, 18 giugno 2022.

### *Landscape-scale management of natural enemies of agricultural pests*

Pest natural enemies are key functional components of managed and natural ecosystems. In the last decades, managing insects, landscapes, and their interactions, to ensure the sustainability of ecosystem services and minimize the induction of disservices has been the focus of applied entomological research. However, this task is particularly challenging, as arthropods are often mobile organisms that depend on the availability of multiple resources occurring across multiple habitats. Their ability to locate these resources depends on their mobility and on the landscape composition, i.e. the relative proportion of habitat types, and configuration, i.e. the spatial arrangement of these habitats. As applied entomologists, to fully understand the processes that govern populations and communities of natural enemies across heterogeneous landscapes, we need to embrace this spatial complexity. As pest managers, we need to know how crop and green infrastructures influence pest population dynamics and their interactions with natural enemies. Starting from the pioneering work on fragmentation and pests, landscape ecology has made significant inroads towards understanding natural enemies' responses to land-use. Here, I will present a novel empirical approach to study species-habitat relationships using network ecology tools. From a policy perspective, a deeper understanding on how habitat-species networks work can open the door to effective landscape management for both beneficial insects and pests.

KEY WORDS: Agro-ecology, Conservation biocontrol, Landscape ecology, Network ecology, Pests

### NATURAL ENEMIES AND PESTS ACROSS AGRICULTURAL LANDSCAPES

Understanding how natural enemies use resources across agricultural landscapes is essential for the design of effective management strategies to support biocontrol. Historically, patch-matrix models rooted in meta-population models (LEVINS, 1969) have largely focused on population responses to the amount and configuration of

remnant suitable habitats within a hostile matrix (TSCHARNTKE *et al.*, 2012). Central tenets of these models are that species dispersal occurs mainly between patches and that the focal community mostly relies on resources occurring within the patches. As it is becoming increasingly clear that many natural enemy and pest species utilize a range of different habitats and resources (SCHELLHORN *et al.*, 2014), landscape ecology has moved beyond the dichotomy of hostile vs. suitable patches to

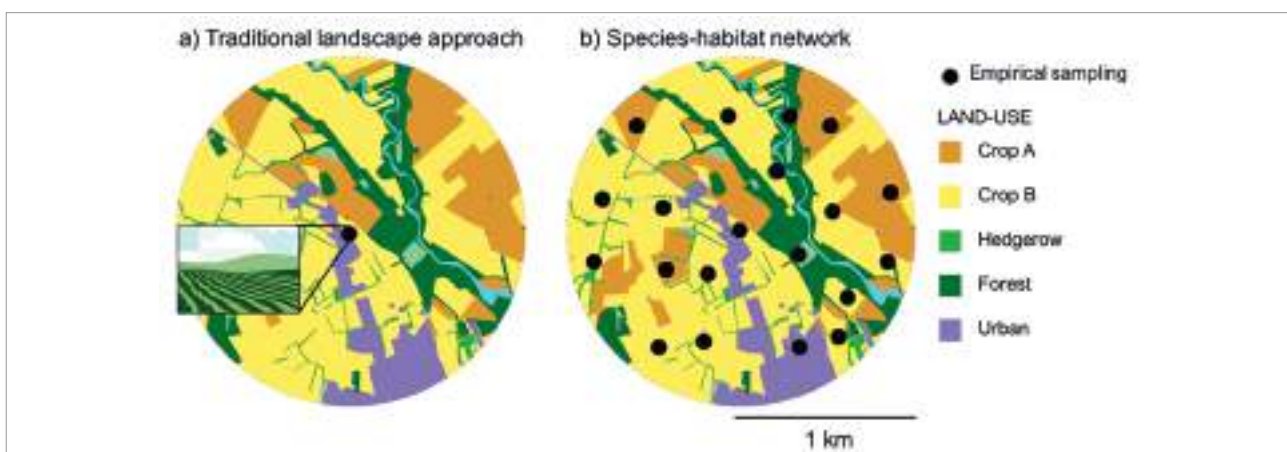


Fig. 1 - a) Traditional landscape approach where pests and natural enemies are sampled only in a focal field, b) Species-habitat network approach where multiple habitats are sampled across the same landscape.

explicitly incorporate the heterogeneity typical of agricultural landscapes (FAHRIG *et al.*, 2011). The field of landscape ecology applied to biocontrol has made significant inroads in understanding natural enemies' responses to landscape processes (TSCHARNTKE *et al.*, 2005; TAMBURINI *et al.*, 2016). In these studies, the species of interest is usually sampled in one focal crop and then related to the surrounding landscape by using the proportion of suitable or unsuitable habitats (Fig. 1a). One downside of this approach, however, is the lack of a mechanistic understanding of the links between multiple habitats and community-level processes, indicating the need for broader conceptual frameworks of spatial patterns in studying conservation biocontrol (LAMI *et al.*, 2021).

BEYOND THE FOCAL HABITAT: THE SPECIES-HABITAT NETWORK

Recently, we proposed to consider the whole landscape as a unit to quantify and analyse natural enemy community response to landscape processes and then to use bipartite networks to analyse the resulting empirical data (MARINI *et al.*, 2019; LAMI *et al.*, 2021). In bipartite

problem is similar to the selection of buffer radii when adopting a traditional approach to quantify landscape composition or configuration (STEFFAN-DEWENTER *et al.*, 2002). Once the spatial extent is defined, the species need to be sampled across the landscape using an 'habitat-centric' approach where the number of sampled sites within one habitat is proportional to its area. In agricultural landscapes, different habitats are often organized in patches including crop fields and semi-natural habitats such as hedgerows or forests. The focal species community may be used to guide the identification of habitat types that are functionally relevant (FAHRIG *et al.*, 2011). Finally, understanding how and why the topology of the networks changes over time, and how these changes affect species resource use across the landscape can help to predict the consequences of human impacts upon natural enemies' dynamics (SCHELLHORN *et al.*, 2015).

To make the concept clear, I will provide a working example of species-habitat network, considering the tachinid species occurring across an agricultural landscape (size: 1 km<sup>2</sup>). Any heterogeneous landscape and the species using its resources can be visualized as a bipartite network. In this example, we sampled the tachinid species

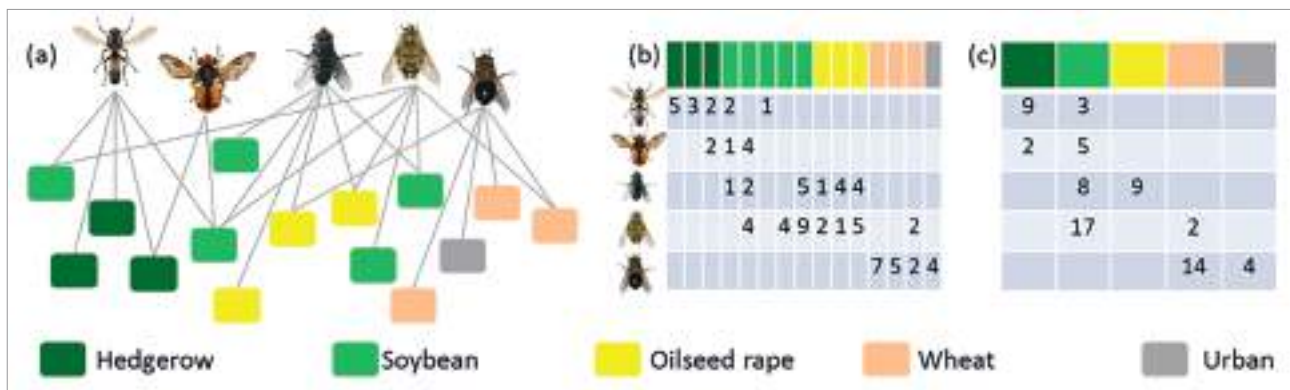


Fig. 2 - a) Example of a species-habitat network composed of 15 sites of varying size and quality belonging to five habitats in which a tachinid community is sampled, b) data matrix that can be derived from the sampling, describing the number of individuals recorded for each species in all sites; c) data matrix that can be derived from the sampling, describing the pooled the number of individuals recorded for each species per habitat category.

networks, two types of nodes exist, and interactions are analysed only between nodes of different types. In particular, we adapted existing bipartite networks to create species-habitat networks where the two types of nodes are the habitat types and the species occurring in each habitat. The links between species and habitats are represented by the number of individuals occurring in a certain habitat. The focal species community would usually belong to the same trophic level sharing a similar functional role such as ground-dwelling predators, parasitoids, insectivorous mammals etc..

Several studies have shown that individual species and community responses to landscape processes depend on the spatial scale over which the landscape metrics are quantified (DAINESE *et al.*, 2015). For ground-dwelling predators such as spiders and carabids the scale can range from a few hundred meters to one kilometre, while for parasitoids the scale can go up to a few kilometres. This

occurring at 15 sites belonging to five habitats (hedgerow, soybean field, oilseed rape field, urban, wheat field) within a landscape mosaic (Fig. 2a). The nodes in the network are represented by the tachinid species and the sampling sites. The numbers indicate the link strength (number of individuals in each site) (Fig. 2b). The number of sampling sites is selected to be representative of the resources and habitat diversity. In the example, the tachinid-habitat network is built using the cumulative abundance from three rounds of sampling (spring, early summer and summer) using a transect walk method. In a transect walk, tachinids are recorded in a fixed width band (typically 5 m wide) within each site. Particular attention should be paid to the functional interpretation of the links. If we consider one crop field in this network, a tachinid species is recorded in that site because individuals can use multiple resources (e.g. host for reproduction, nectar for adult feeding or plants for roosting or shelter) or simply

because individuals are using that site as a stepping stone for dispersal. Hence, the choice of the sampling method will dictate the interpretation of the ecological data.

#### ANALYTICAL TOOLS TO DESCRIBE SPECIES-HABITAT NETWORKS

The appeal of network metrics is that they enable very powerful visualizations via a common language that defines the processes under investigation in terms of nodes and links. The existing metrics used to study properties of bipartite networks in both ecology and social sciences can easily be adapted to the study of species-habitat networks. These metrics can be broadly divided in two groups: properties of the whole network and node-level metrics that measure the role of single habitat sites or species in the landscapes. On the one hand, metrics at the network level synthesises information over the entire set of nodes and links. For example, the number of nodes (e.g. the species richness), the density of connections or the overall specialization are statistics used to describe the overall complexity of a network with a single number. On the other hand, metrics at the individual node level quantify differences in relative importance of either site or species. We can be interested in an individual or species that transmits disease, or identify species whose removal will result in secondary extinctions, or key habitat patches that connect other habitats (LAU *et al.*, 2017). As metric choice will depend on the question, we advocate a hypothesis-driven approach whereby users decide *a priori* which metrics will address which research question. Extensive reviews of these metrics can be found in several studies (e.g. DORMANN *et al.*, 2009).

#### IMPLICATIONS FOR BIOCONTROL ENHANCEMENT

Land-use change is massively reshaping agricultural landscapes worldwide, and is recognized as a key driver of biocontrol deterioration (LALIBERTÉ and TYLIANAKIS 2010; DAINESE *et al.*, 2019). Considering the upcoming EU targets to reduce by 50% the use and the risk of chemical pesticides by 2030 (SCHEBESTA and CANDEL 2020), an urgent question is to understand how to manage whole landscapes to maximize functional biodiversity and the associated biocontrol services. One of the key challenges in conservation biocontrol is to identify landscape-wide interventions to support natural enemies and simultaneously to reduce pest pressures on crops (SCHELLHORN *et al.*, 2014). These interventions often require the introduction of novel habitats (e.g. hedgerows, flower strips) or changes in local field management (e.g. introducing rotation, conservation agriculture or organic farming etc.) (TAMBURINI *et al.*, 2016). One of the central assumption of many interventions to boost biocontrol is that many pest control agents are enhanced by the proximity to semi-natural areas (SCHELLHORN *et al.*, 2015) and that the spill-over of beneficial organisms from these habitats to agricultural fields is often fundamental for pest control enhancement (BLITZER *et al.*, 2012). However, we do not know yet how frequent is the movement of natural ene-

mies from semi-natural habitats to crops and *vice versa*. Recently, we have tried to answer this important question by applying the species-habitat network approach to spiders and carabids inhabiting intensive agricultural landscapes in North Italy. In a first study, NARDI *et al.* (2019) showed that ground-dwelling spiders possess a high habitat specialization that constrains the ability to move between crop and non-crop habitats. In particular, encouraging the spill-over of spiders from semi-natural habitats to crops to enhance biological control might work for permanent crops, while for annual crops it would be more effective to improve local field quality for spiders that are crop specialists or to introduce open semi-natural habitats such as meadows or diverse grass margins. In a second study, LAMI *et al.* (2021) showed that several carabid species are super-generalist and become even more generalist when landscapes are very simplified suggesting high chances of spill-over between different habitats. Another interesting potential application of this framework is to study pests' occurrence across different habitat types at the landscape scale. For instance, CAPPELLARI *et al.* (2022) applied the species-habitat framework to elucidate which habitats are suitable for the vectors of *Xylella fastidiosa*, and how the vectors could potentially spread from non-crop habitats to olive groves. With this study, it was possible to identify key habitat patches that support vector populations, increasing the risks for pathogen transmission to olive trees. Another emerging topic in conservation biocontrol is whether increasing crop field size consistently exacerbate insect pest problems by disrupting trophic interactions between pests and natural enemies (MARINI *et al.*, 2023). While the traditional landscape approach has failed to answer this very important question, species-habitat networks can help elucidating the spill-over dynamics and to help identifying optima landscape configuration to support an effective biocontrol service.

In conclusion, one key advantage of the application of the species-habitat network approach to conservation biocontrol is that the scale of the derived ecological information will match the scale of management interventions. Pest managers need to know how the different configurations of crop and green infrastructures influences pest population dynamics and their interactions with natural enemies. Only a deeper understanding of how natural enemies and pests use resources and move across heterogeneous landscapes can open the door to effectively manage the landscape to reduce pest pressures using natural biocontrol.

#### REFERENCES

- BLITZER E.J., DORMANN C.F., HOLZSCHUH A., KLEIN A.M., RAND T.A., TSCHARNTKE T., 2012 - *Spillover of functionally important organisms between managed and natural habitats*. - Agric. Ecosyst. Environ., 146: 34–43.
- CAPPELLARI A., SANTOIEMMA G., SANNA F., D'ASCENZO D., MORI N., LAMI F., MARINI L., 2022 - *Spatio-temporal dynamics of vectors of Xylella fastidiosa subsp.*

- pauca across heterogeneous landscapes.* - Entomol. Gen., 42: 515–521.
- DAINESE M., INCLÁN D.L., SITZIA T., MARINI L., 2015 - *Testing scale-dependent effects of semi-natural habitats on farmland biodiversity.* - Ecol. Appl., 25: 1681–1690.
- DAINESE M., MARTIN E.A., AIZEN M.A., ALBRECHT M., BARTOMEUS I., BOMMARCO R., *et al.*, STEFFAN-DEWENTER I., 2019 - *A global synthesis reveals biodiversity-mediated benefits for crop production.* - Scie. Advances: eaax0121.
- DORMANN C.F., FRUND J., BLUTHGEN N., GRUBER B., 2009 - *Indices, graphs and null models: Analyzing bipartite ecological networks.* - The Open Ecol. J., 2: 7–24.
- FAHRIG L., BAUDRY J., BROTONS L., BUREL F.G., CRIST T.O., FULLER R.J., *et al.*, MARTIN J.L., 2011 - *Functional landscape heterogeneity and animal biodiversity in agricultural landscapes.* - Ecol. Lett., 14: 101–112.
- LALIBERTÉ E., TYLIANAKIS J.M., 2010 - *Deforestation homogenizes tropical parasitoid–host networks.* - Ecology, 91: 1740–1747.
- LAU M.K., BORRETT S.R., BAISER B., GOTELLI N.J., ELLISON A.M., 2017 - *Ecological network metrics: opportunities for synthesis.* - Ecosphere, 8: e01900.
- LEVINS R., 1969 - *Some demographic and genetic consequences of environmental heterogeneity for biological control.* - Bull. Entomol. Soc. Am., 15: 237–240.
- MARINI L., BATÁRY P., TSCHARNTKE T., 2023 - *Testing the potential benefits of small fields for biocontrol needs a landscape perspective.* - Proc. Nat. Acad. Sci., 120: e2218447120.
- MARINI L., BARTOMEUS I., RADER R., LAMI F., 2019 - *Species–habitat networks: A tool to improve landscape management for conservation.* - J. Appl. Ecol., 56: 923–928.
- NARDI D., LAMI F., PANTINI P., MARINI L., 2019 - *Using species–habitat networks to inform agricultural landscape management for spiders.* - Biol. Conserv., 239: 108275.
- SCHEBESTA H., CANDEL J.J., 2020 - *Game-changing potential of the EU's Farm to Fork Strategy.* - Nat. Food, 1: 586–588.
- SCHELLHORN N.A., BIANCHI F.J.J.A., HSU C.L., 2014 - *Movement of entomophagous arthropods in agricultural landscapes: Links to pest suppression.* - Ann. Rev. Entomol., 59: 559–581.
- SCHELLHORN N.A., GAGIC V., BOMMARCO R., 2015 - *Time will tell: resource continuity bolsters ecosystem services.* - Trends Ecol. Evol., 30: 524–530.
- STEFFAN-DEWENTER I., MÜNZENBERG U., BÜRGER C., THIES C., TSCHARNTKE T., 2002 - *Scale-dependent effects of landscape context on three pollinator guilds.* - Ecology, 83: 1421–1432.
- TAMBURINI G., DE SIMONE S., SIGURA M., BOSCUCCI F., MARINI L., 2016 - *Conservation tillage mitigates the negative effect of landscape simplification on biological control.* - J. Appl. Ecol., 53: 233–241.
- TSCHARNTKE T., KLEIN A.M., KRUESS A., STEFFAN-DEWENTER I., THIES C., 2005 - *Landscape perspectives on agricultural intensification and biodiversity - Ecosystem service management.* - Ecol. Lett., 8: 857–874.
- TSCHARNTKE T., TYLIANAKIS J.M., RAND T.A., DIDHAM R.K., FAHRIG L., BATÁRY P., *et al.*, WESTPHAL C., 2012 - *Landscape moderation of biodiversity patterns and processes - eight hypotheses.* - Biol. Reviews, 87: 661–685.



## MANIPULATING BELOWGROUND-ABOVEGROUND INTERACTIONS TO ENHANCE PLANT DEFENCE

EMILIO GUERRIERI <sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Istituto per la Protezione Sostenibile delle Piante, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Strada delle Cacce, 73 – 10135 Torino, Italia. E-mail: emilio.guerrieri@ipsp.cnr.it*

Lettura tenuta durante la Tavola Rotonda “Biological pest control: managing multitrophic interactions for sustainable agriculture”. Seduta pubblica dell’Accademia – Firenze, 18 giugno 2022.

### *Manipulating belowground-aboveground interactions to enhance plant defence*

In the last decade, a growing evidence built up on the role that belowground symbionts play in enhancing plant defence against aboveground insect pests. Arbuscular Mycorrhizal Fungi and *Trichoderma* species/strains have been deeply studied for their effect on plant direct and indirect defences. All these studies have demonstrated the species-specificity of these complex interactions particularly in respect to the symbiont strain and the feeding habit of targeted pest. Consequently, more data are needed to predict the output on plant defence against specific pests as elicited by specific root symbionts. The exploitation of belowground-aboveground interaction perfectly combines with other eco-friendly strategies of plant protection, including the use of plant-derived compounds.

KEY WORDS: Arbuscular Mycorrhizal Fungi, *Trichoderma*, Aphids, Parasitoids, direct and indirect defence

### INTRODUCTION

Plant are sessile organisms that cannot move to escape biotic (and abiotic) stresses. However, far from being passive receivers, they have evolved sophisticated mechanisms of defence that can be roughly divided into constitutive and induced.

Constitutive defences are always active and represent the first barrier against biotic and abiotic stresses. They depend on intrinsic factors, including plant age and plant phenology, and extrinsic ones as constituted by the complex environmental conditions including temperature, humidity, light and by soil features (belowground) (Fig. 1).

Constitutive defences have a high metabolic cost and to save it plants evolved the so-called induced defences that mount only following a triggering stress. Herbivore-induced defences are among the most studied examples of induced defences. They include a complex system of metabolic responses that have proved to be specific in relation to the feeding habit of the invader. Simplifying, while insect chewers elicit the activation of the jasmonic acid pathway, piercing-sucking insects (and plant pathogens) trigger the activation of the salicylic acid one. In both cases, the metabolic cascade switches on specific defensive genes and the final release of specific blends of Volatile Organic Compounds (VOC).

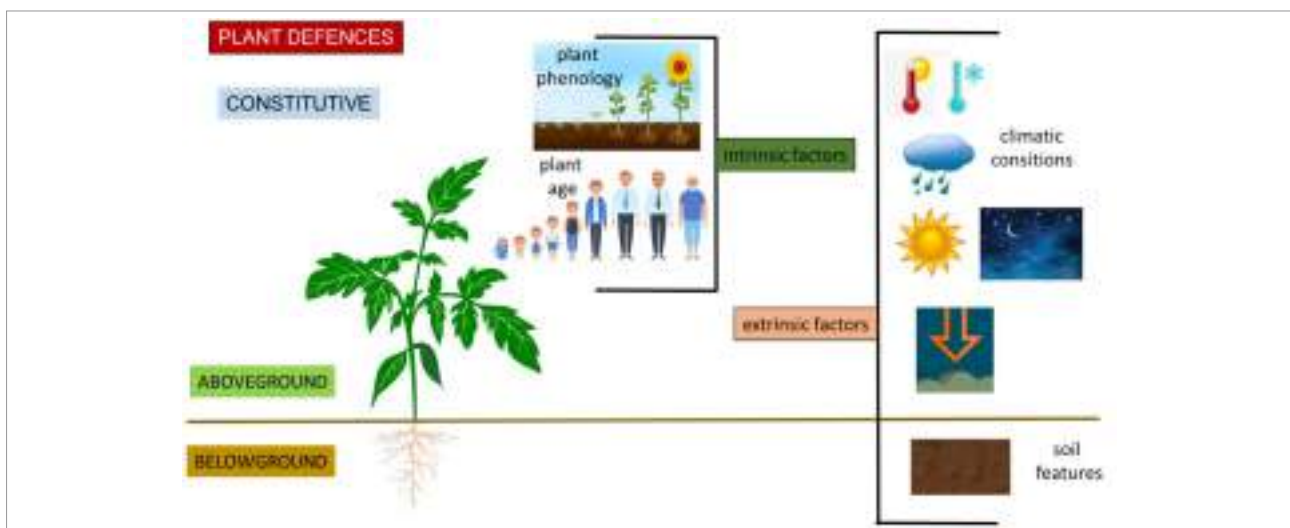


Fig. 1 - Schematic representation of factors affecting plant constitutive defences.

The defensive output of induced responses could be direct or indirect. Direct effects on herbivore insect include the production of toxic compounds that alter its behaviour, development and reproduction. Indirect effects include the

Here, we will focus on arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and on *Trichoderma* spp and their effects on the activation of defences against different pests in tomato plant.

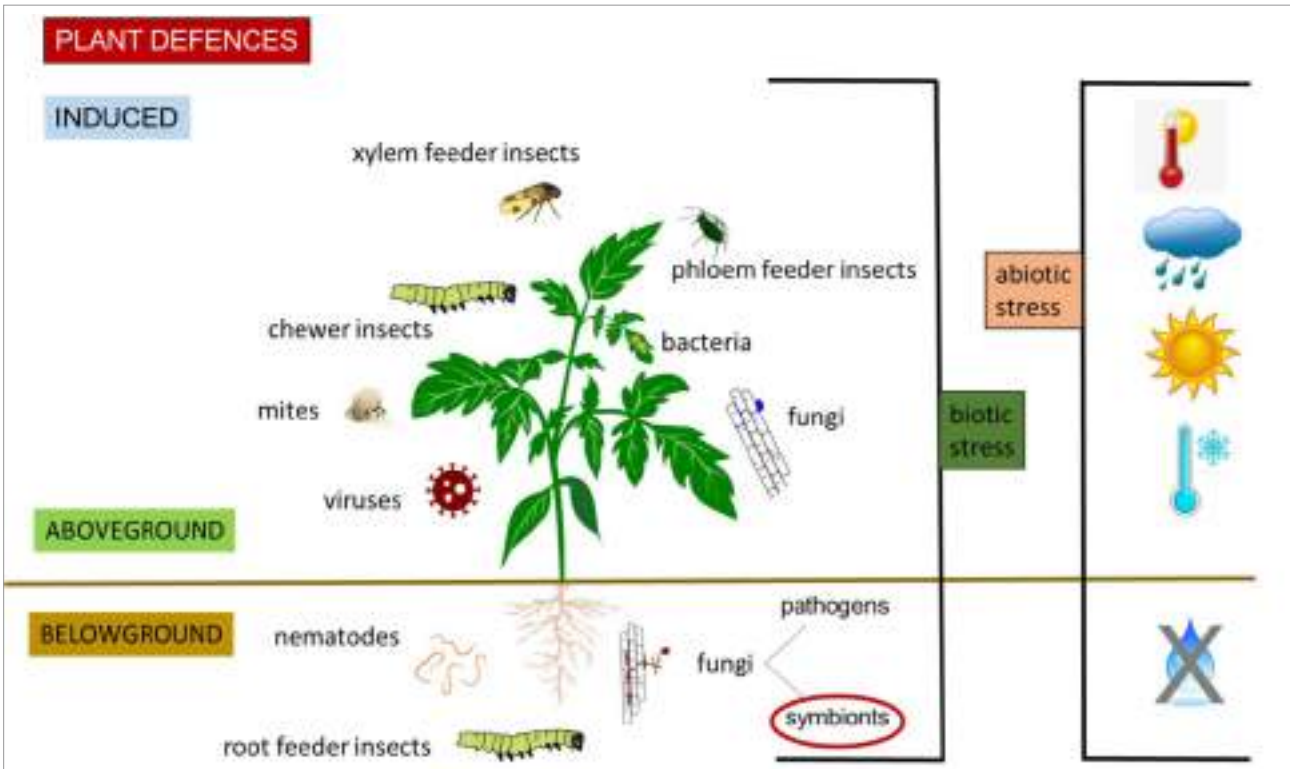


Fig. 2 - Schematic representation of factors affecting plant induced defences.

attraction of the natural antagonists of the herbivore mediated by the release of specific VOC. In both cases, the literature is particularly rich in examples covering a number of plant-pest-natural enemy systems.

Only recently, a new component has been considered in the interactions between plants and insects: the root symbionts (Fig. 2). By considering the incredible variety of soil microbiota, the fact that 80% of plant species are colonized by arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and that antagonistic fungi in the genus *Trichoderma* are ubiquitous, one could wonder whether “constitutive” plant defence do exist in nature. In fact, root colonization by AMF, Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) or *Trichoderma* spp triggers plant responses that could impact on below and aboveground insect populations. Hence the question: could we profitably use these interactions for enhancing plant direct and indirect defence against insect pests?

#### *The role of root symbionts as elicitors of plant defences*

Root symbionts involved in the elicitation of plant defences belong to 3 main groups: the mycorrhizal fungi, the antagonistic fungi, the Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR). The multiple effects induced by these organisms on plant direct and indirect defences are depicted in Fig. 3

#### AMF AND PLANT DEFENCE

Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF, phylum Glomeromycota) are common belowground plant mutualists and can influence the quantity and quality of resources available to herbivores. AMF associate with 80% of vascular land plants worldwide helping in phosphate and other nutrients supply especially in phosphorus deficient soils, enhancing plant resistance to drought (VOLPE *et al.*, 2018) and lending a significant higher degree of bioprotection against various pathogens, including nematodes (BOROWICZ, 2006 and references therein) and fungi (FRITZ *et al.*, 2006). A positive effect of AM fungi on soil structure has been indicated, making them a key component of sustainable agriculture (JOHANSON *et al.*, 2004). In some cases, plants growing with AM fungi can be 30% larger than plants without AM fungi (GWORGWOR and WEBER, 2003), and the increased quantity of resources caused by AM fungi has an impact on herbivore performance. For example, AM fungi may decrease herbivore performance by increasing their plant hosts’ ability to produce nutritionally expensive chemical defences (VANNETTE and HUNTER, 2013).

In tomato plants, root colonization by the AMF *Funneliformis mosseae* results in the induction of both direct and indirect mechanisms of defence against aphids (Fig. 4) (GUERRIERI *et al.*, 2004).

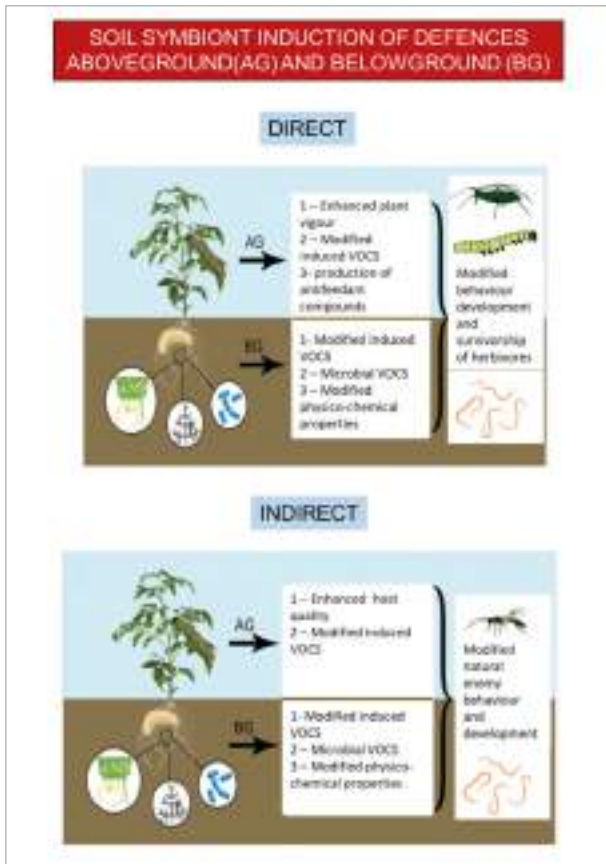


Fig. 3 - Schematic representation of the effects of root symbionts on plant direct and indirect defences (modified from RASMANN *et al.*, 2017).

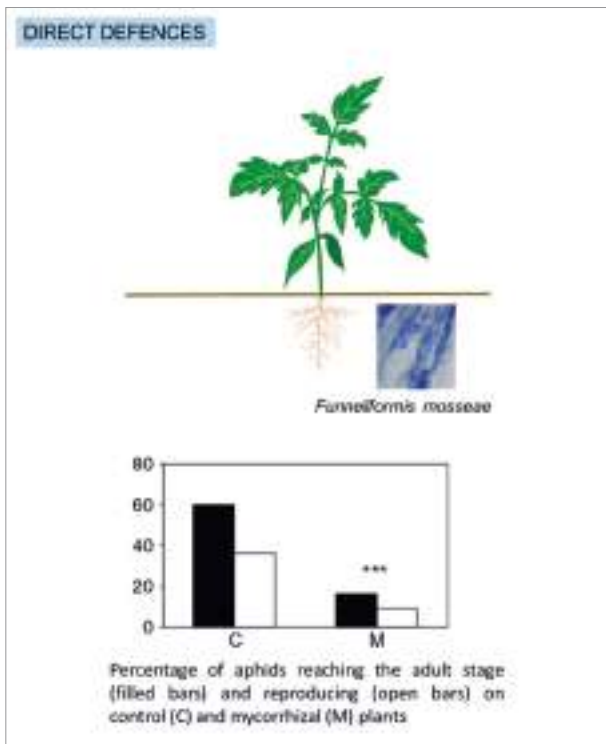


Fig. 4 - Direct defences against the tomato aphid *Macro-siphum euphorbiae* induced by AMF colonization (modified from GUERRIERI *et al.*, 2004)

On mycorrhizal tomato less than 40% *Macro-siphum euphorbiae* aphids reached the adult stage and only about 10% reproduced. These effects are probably related to the production of antixenotic compounds that reduced the adsorption of plant nutrients coupled to a reduced palatability of the plant causing an alteration in the fixing behaviour of the aphids.

A significant increase of induced defences was also noted in tomato plants colonised by *F. mosseae*.

A significant increase of attraction towards the aphid parasitoid *Aphidius ervi* was recorded for uninfested mycorrhizal tomato (AMF) in respect to non-colonised uninfested control (CONTROL) (Fig. 5) and this was related to a change in the VOC released by plants upon root colonization by AMF. This difference in attractiveness was not noted when comparing uninfested mycorrhizal (AMF) and aphid-infested non-colonised (PHC) tomato

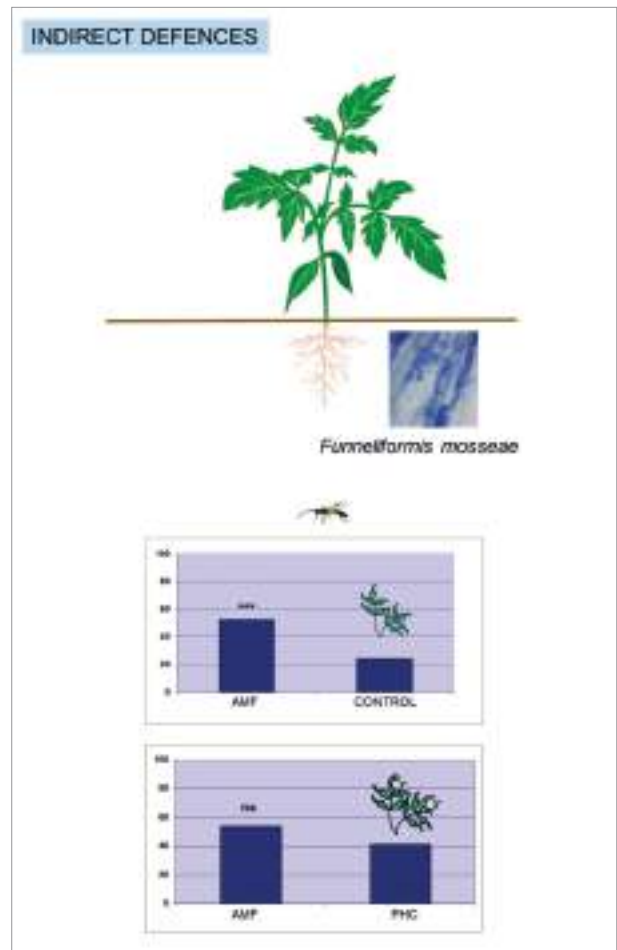


Fig. 5 - Indirect defences against tomato aphid *Macro-siphum euphorbiae* induced by AMF colonization (modified from GUERRIERI *et al.*, 2004)

plants (Fig. 5). Hence, it was hypothesized that root colonization by *F. mosseae* induced the release of VOC that “mimic” aphid attack. It is known that a specific threshold of infestation in terms of number of aphids and duration of their feeding activity is needed to render a plant attractive towards an aphid parasitoid (GUERRIERI *et al.*, 1999). In this context, mycorrhizal colonization could re-

duce the temporal gap between the ongoing aphid colonization and the arrival of the natural antagonist thus improving the biological control of aphid pests.

resulted in an enhanced defensive response by the plant as shown by a reduced survival rate of the tested aphid. Similarly, root colonization by *Trichoderma atroviride* result-

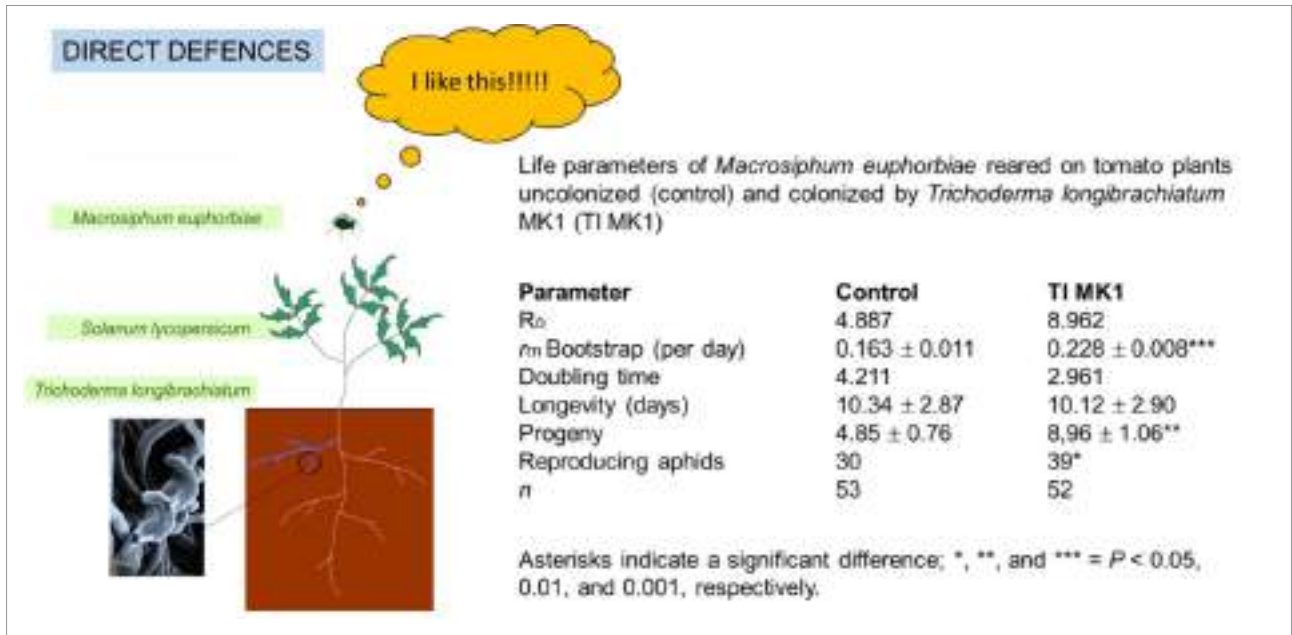


Fig. 6 - Reduction of direct defences against the tomato aphid *Macrosiphum euphorbiae* upon colonization by *Trichoderma longibrachiatum*.

#### TRICHODERMA AND PLANT DEFENCE

Fungi belonging to the genus *Trichoderma* are distributed worldwide. They are known for their antagonistic activity against other microbes and their ability to colonize roots, establish chemical communication with the plant, and systemically alter the expression of many host genes. The success of this interaction may depend on the fungal strain-plant genotype combination (TUCCI *et al.*, 2011). The relevant changes caused by *Trichoderma* spp. in the plant physiology often result in an improved abiotic stress resistance, nutrient uptake, resistance to pathogens, and photosynthetic efficiency (HERMOSA *et al.*, 2012). Whilst a number of papers reported the efficacy of *Trichoderma* spp. or their metabolites in terms of induction of systemic resistance against plant pathogens (e.g. VINALE *et al.*, 2012), only in recent years it has been reported how these antagonist fungi can alter the performance of herbivores and their natural enemies aboveground.

In the system composed by tomato plant and the tomato aphid *Macrosiphum euphorbiae*, root colonization by *Trichoderma longibrachiatum* (strain MK1) resulted in an enhanced performance of the aphid as represented by a significant increase in both  $r_m$  index and progeny (Fig. 6).

This result was most probably due to the enhanced nutrition quality of the tomato as induced by root colonization by this specific strain of *Trichoderma*.

The specificity of plant responses in respect to different species/strains of root symbiont was confirmed in subsequent experiments including the same plant-aphid system and *Trichoderma atroviride* (strain P1) (Fig. 7)

In this case, the presence of the antagonistic symbiont

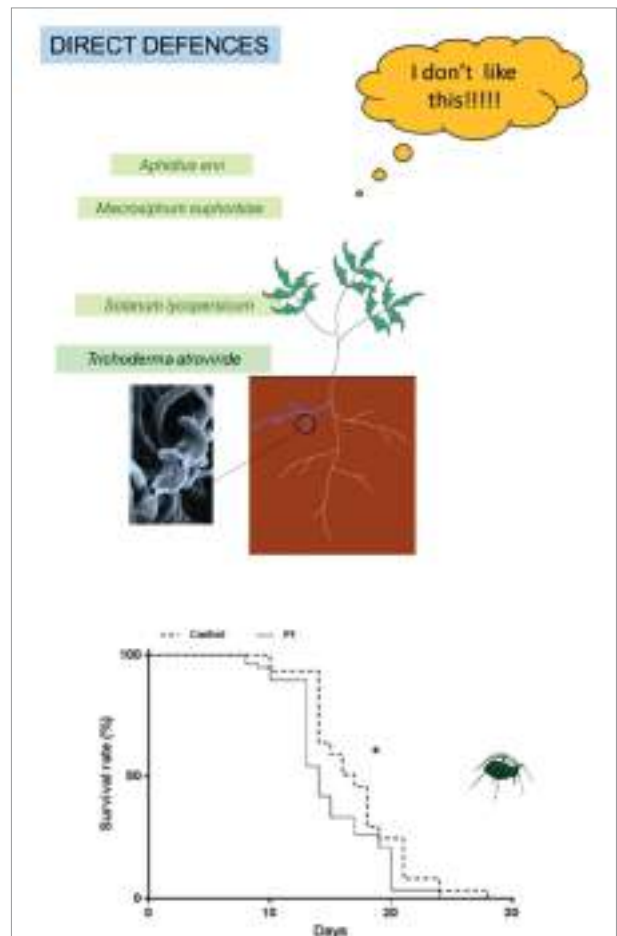


Fig. 7 - Induction of direct defences against the tomato aphid *Macrosiphum euphorbiae* upon colonization by *Trichoderma atroviride*.

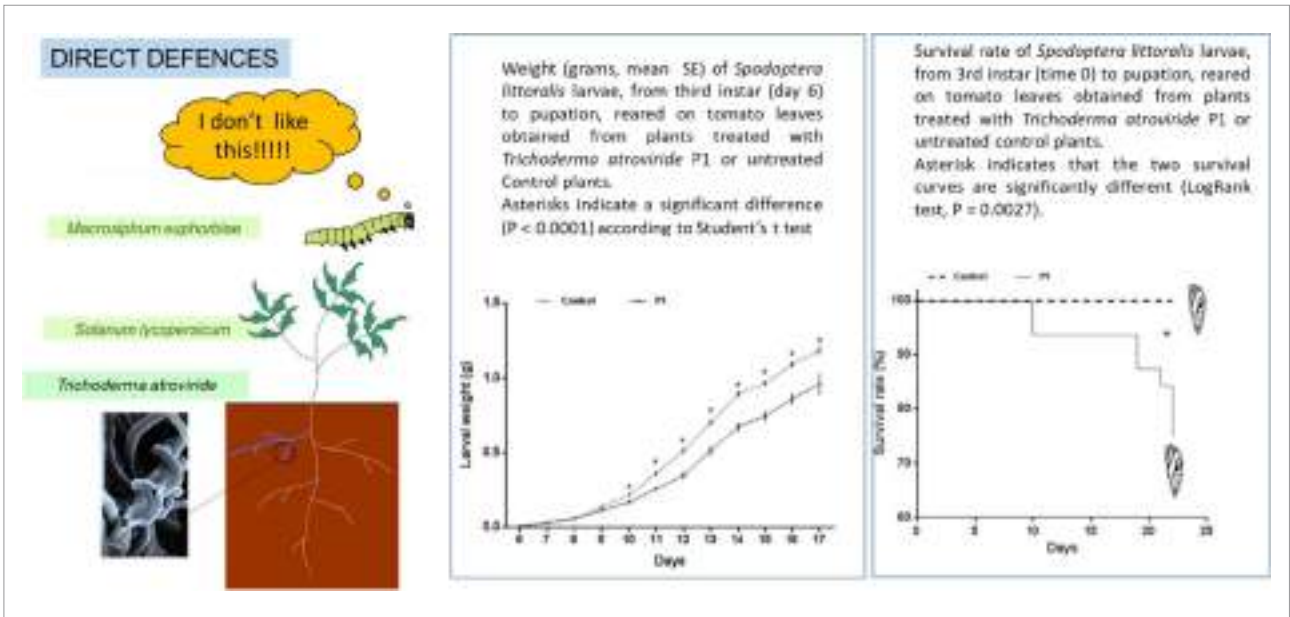


Fig. 8 - Induction of direct defences against *Spodoptera littoralis* upon colonization by *Trichoderma atroviride*.

ed in an enhanced defensive response against the chewer *Spodoptera littoralis* both in terms of larval weight and survival rate (to pupation) (COPPOLA *et al.*, 2019) (Fig. 8)

These differential responses induced by different species /strains of *Trichoderma* in terms of direct defences disappeared when considering plant indirect defences. Overall, regardless the species of *Trichoderma* colonizing tomato roots, we observed a significant increase of attractiveness towards the aphid parasitoid *A. ervi* (Figg. 9-11)

The increase of attractiveness towards *A. ervi* induced by *T. longibrachiatum* colonization was related to the release of specific VOC (Fig. 8) that have been proved important for the foraging behaviour of this parasitoid (SASSO *et al.*, 2007; 2009). The effect on indirect defences induced by *T. longibrachiatum* counter balance the abovementioned increased performance of the aphid pest *M. euphorbiae* elicited by the same fungal species.

Similarly, tomato colonization by *T. atroviride* (strain P1) resulted in the enhanced release of specific VOC and in turn to an increased attractiveness towards *A. ervi* (COPPOLA *et al.*, 2019)

Finally, a synergistic effect on the attractiveness towards *A. ervi* was recorded when tomato plants were colonized by *T. afrohartianum* (strain T22) and infested by the aphid *Macrosiphum euphorbiae* (COPPOLA *et al.*, 2017)

SUMMARY AND FUTURE DIRECTIONS

The species/specificity of plant responses to root colonization by different species and strains of symbionts requires a thorough effort of characterization if we want to exploit these interactions for the sustainable control of agricultural pests. These aspects are particularly important within the framework of EU Green Deal objectives

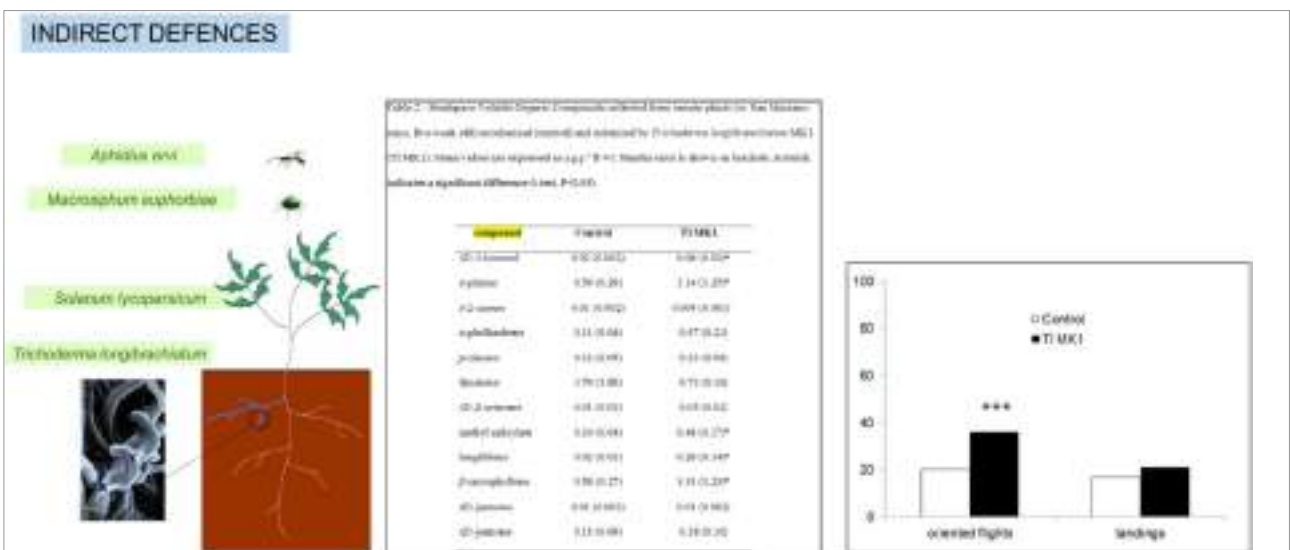


Fig. 9 - Indirect defences against tomato aphid *Macrosiphum euphorbiae* induced by *Trichoderma longibrachiatum*



rosiphum euphorbiae and its natural antagonists. - Mol. Plant Microbe Interactions, 26: 1249-1256.

COPPOLA M., CASCONI P., CHIUSANO M.L., COLANTUONO C., LORITO M., PENNACCHIO F., RAO R., WOO S.L., GUERRIERI E., DIGILIO M.C., 2017 - *Trichoderma harzianum* enhances tomato indirect defense against aphids. Insect Science Special Issue on Plant Insect Microbe Interactions. - Insect Sci., 24: 1025-1033.

COPPOLA M., CASCONI P., DI LELIO I., WOO S.L., LORITO M., RAO R., PENNACCHIO F., GUERRIERI E., DIGILIO M.C., 2019 - *Trichoderma atroviride* PI colonization of tomato plants enhances both direct and indirect defence barriers against insects. - Frontiers in Physiol., 10: 813.

FRITZ M., JAKOBSEN I., LYNGBJÆR M.F., THORDAL-CHRISTENSEN H., PONS-KÜHNEMANN J., 2006 - *Arbuscular mycorrhiza reduces susceptibility of tomato to Alter-*

*interactions in the mycorrhizosphere and their significance for sustainable agriculture.* - FEMS Microbiol. Ecol., 48: 1-13

RASMANN S., BENNETT A., BIERE A., KARLEY A., GUERRIERI E., 2017 - *Root symbionts: powerful drivers of plant above- and belowground indirect defences. Review.* - Insect Science Special Issue on Plant Insect Microbe Interactions. Insect Sci., 24: 947-960.

SASSO R., IODICE L., DIGILIO M.C., CARRETTA A., ARIATI L., GUERRIERI E., 2007 - *Host-locating response by the aphid parasitoid Aphidius ervi to tomato plant volatiles.* - J. Plant Interactions, 2: 175-183.

SASSO R., IODICE L., WOODCOCK C.M., PICKETT J.A., GUERRIERI E., 2009 - *Electrophysiological and behavioural responses of Aphidius ervi (Hymenoptera: Braconidae) to tomato plant volatiles.* - Chemoecology, 19: 195-201.

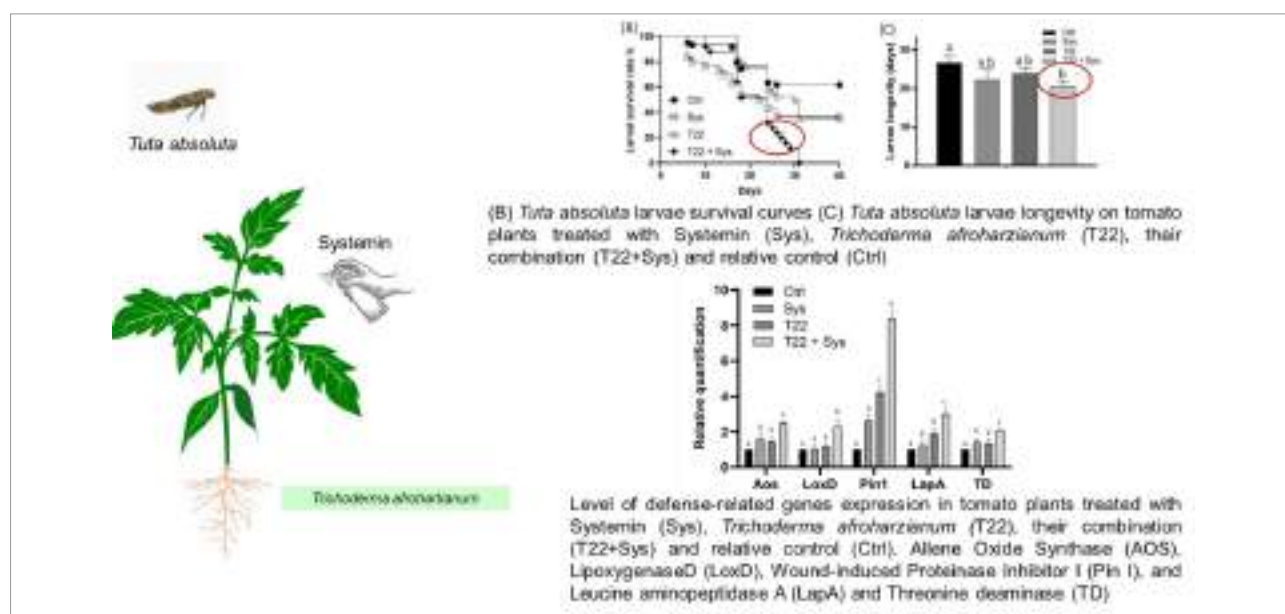


Fig. 12 - Effect of the combined use of a plant derived compound aboveground (systemin) and *Trichoderma* species (*T. afrohartianum*, T22) belowground for the control of the tomato pinworm.

narria solani. - Mycorrhiza, 16: 413-419.

GUERRIERI E., POPPY G.M., POWELL W., TREMBLAY E., PENNACCHIO F., 1999 - *Induction and systemic release of herbivore-induced plant volatiles mediating in-flight orientation of Aphidius ervi (Hymenoptera: Braconidae).* - J. Chem. Ecol., 25: 1247-1261.

GUERRIERI E., LINGUA G., DIGILIO M.C., MASSA N., BERTA G., 2004 - *Do interactions between plant roots and the rhizosphere affect parasitoid behaviour? New Perspectives.* - Ecol. Entomol., 29: 753-756.

GWORGWOR N.A., WEBER H.C., 2003 - *Arbuscular mycorrhizal fungi-parasite-host interaction for the control of Striga hermonthica (Del.) Benth. in sorghum [Sorghum bicolor (L.) Moench].* - Mycorrhiza, 13: 277-281.

HERMOSA R., VITERBO A., CHET I., MONTE E., 2012 - *Plant-beneficial effects of Trichoderma and of its genes.* - Microbiology, 158: 17-25.

JOHANSON J.F., PAUL L.R., FINLAY R.D., 2004 - *Microbial*

TUCCI M., RUOCCO M., DE MASI L., DE PALMA M., LORITO M., 2011 - *The beneficial effect of Trichoderma spp. on tomato is modulated by the plant genotype.* - Mol. Plant Pathol., 12: 341-354.

VANNETTE R.L., HUNTER M.D., 2013 - *Mycorrhizal abundance affects the expression of plant resistance traits and herbivore performance.* - J. Ecol., 101:1019-1029

VINALE F., SIVASITHAMPARAM K., GHISALBERTI E. L., RUOCCO M., WOO S., LORITO M., 2012 - *Trichoderma secondary metabolites that affect plant metabolism.* - Nat. Prod. Commun., 7: 1545.

VOLPE V., CHITARRA W., CASCONI P., VOLPE M.G., BARTOLINI P., MONETI G., PIERACCINI G., DI SERIO C., MASERTI B., GUERRIERI E., BALESTRINI R., 2018 - *The association with two different arbuscular mycorrhizal fungi differently affects the water stress tolerance in tomato.* - Front. Plant. Sci, section Plant Microbe Interactions, 9: 1480.





## THE NON-TARGET EFFECTS OF INSECTICIDES ON INSECT NATURAL ENEMIES

ANTONIO BIONDI <sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Department of Agricultural, Food and Environment, University of Catania. E-mail: Antonio.biondi@unict.it*

Sintesi della lettura tenuta durante la Tavola Rotonda “Biological pest control: managing multitrophic interactions for sustainable agriculture”. Seduta pubblica dell’Accademia, Firenze, 10 giugno 2022.

The widespread use of synthetic insecticides is one of the main consequences of the *Green revolution* (NEWMAN, 2015). In that era, insecticides were only considered substances used to kill insect pests with the aim of increasing crop yield (COOPER & DOBSON, 2007). For several decades, the potential ecotoxicological outcomes of such practice have been neglected by the agroindustry and by policy makers (RATTNER, 2009). Only after the warnings by various environmentalists worldwide, the most renowned being Rachel Carson with the book *Silent spring*, the awareness of the potential risks posed by pesticides on wildlife and on their ecological services increased (CARSON, 1962, NEWMAN, 2015). Biological control is, together with pollination, the agroecological service more at risk for side effects of insecticides. The toxicological impact toward insect natural enemies needs thus to be carefully evaluated prior introducing any toxicant into crop protection protocols. However, such an assessment is a high challenging task due to the high variety of insecticide mode of actions and, more importantly, because of the extreme biological and ecological diversity of non-target organisms (BIONDI *et al.*, 2012). Old generation insecticides were characterized by strong acute toxicity toward a broad range of exposed organisms. The assessment of their target and non-target toxicity is traditionally expressed with concentration-mortality response indexes, such as the estimation of median lethal concentrations (DESNEUX *et al.*, 2007). By contrast, novel insecticides are developed with the main aim of being as more selective as possible. For this, novel insecticide mode of actions and applications are continuously discovered and implemented into the crop protection practice. Such substances are usually considered as *slower acting* because inducing a high degree of chronic sublethal effects rather than lethal ones (GUEDES *et al.*, 2016). Sublethal effects are those physiological and behavioral modifications occurring in organisms survived to the exposure to sublethal concentrations of insecticides (DESNEUX *et al.*, 2007). In pests, insecticide sublethal effects translate into the prompt reduction of crop damage and in a longer-term reduction in pest population levels. However, for insect natural enemies the consequences of sublethal exposure are less obvious and are very often crucial for the ecotoxicological assessment and finally for the sustainability of crop protection programs involving novel insecticides (DESNEUX *et al.*, 2007; BIONDI *et al.*, 2013).

Indeed, sublethal effects of insecticides on insect predator and parasitoid are the consequence of the diverse types of exposure, i.e., topical, residual and for ingestion via the plant or via the prey/host, of the intrinsic physiological and biological features of the natural enemies, and of the extraordinary diversity of prey/predator and host/parasitoid interaction. Such scenario calls for a *case by case* evaluation of the potential side effects of novel insecticides toward natural enemies, before any novel insecticide get widespread used. This aspect is crucial for the current need of implementing resilient and sustainable coping system, as required by the modern agricultural models.

KEY WORDS: Biological control, Biopesticides, Ecotoxicology, Integrated Pest Management, Sublethal effects.

### LITERATURE

- BIONDI A., MOMMAERTS V., SMAGGHE G., VIÑUELA E., ZAPPALÀ L., DESNEUX N., 2012 – *The non-target impact of spinosyns on beneficial arthropods*. - Pest Manag. Sci., 68: 1523-1536.
- BIONDI A., ZAPPALÀ L., STARK J.D., DESNEUX N., 2013 – *Do biopesticides affect the demographic traits of a parasitoid wasp and its biocontrol services through sublethal effects?* - PLoS One, 8: e76548.
- CARSON R., 1962 - *Silent spring*. Houghton Mifflin, Boston, MA
- COOPER J., DOBSON H., 2007 - *The benefits of pesticides to mankind and the environment*. - Crop Prot., 26: 1337-1348.
- DESNEUX N., DECOURTYE A., DELPUECH J.M., 2007 – *The sublethal effects of pesticides on beneficial arthropods*. - Ann. Rev. Entomol., 52: 81-106.
- GUEDES R.N.C., SMAGGHE G., STARK J.D., DESNEUX N., 2016 – *Pesticide-induced stress in arthropod pests for optimized integrated pest management programs*. - Annu. Rev Entomol., 61: 43-62.
- NEWMAN M.C., 2015 - *Fundamentals of Ecotoxicology, The science of pollution*. – CRC Press 632 pp.
- RATTNER B.A., 2009 - *History of wildlife toxicology*. – Ecotoxicology, 18: 773-783.



SEDUTA PUBBLICA, FIRENZE, 18 NOVEMBRE 2022

Tavola Rotonda su:

EDIBLE INSECTS: FROM BIOLOGY TO APPLICATIONS

Coordinatori:

MORENA CASARTELLI Accademica

e GIANLUCA TETTAMANTI



## PROGRESS AND CHALLENGES OF INSECTS AS FOOD AND FEED

ARNOLD VAN HUIS<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Laboratory of Entomology, Wageningen University, PO Box 16, 6700 AA Wageningen, the Netherlands.*  
E-mail: Arnold.vanhuis@wur.nl

Lettura tenuta durante la Tavola Rotonda “Edible insects: from biology to applications”. Seduta pubblica dell’Accademia – Firenze, 18 novembre 2022.

### *Progress and challenges of insects as food and feed*

An overview is given on recent developments concerning insects as food and feed. Most production is targeted towards pet food, but in the next two decades it will shift to aquafeed. More than 80% of all publications dealing with edible insects have appeared during the last six years. Genetics are increasingly utilized to improve production. The environmental impact of producing insects compares well to other alternative proteins, in particular their capacity to degrade organic waste streams. Edible insects are not only a good source of nutrients but also seem to provide health benefits, not only for humans and animals but also for plants (the left-over substrate). The challenge of convincing Western consumers is reviewed and whether sustainability is an issue. Processing techniques are being developed. The sector of insects as food and feed is developing fast, thanks also to an increasingly conducive legislative framework.

KEY WORDS: edible insects, biodegradation, black soldier fly, organic waste streams, health

### SYNTHESIS OF LECTURE

The recent interest in insects as food and feed started after the FAO publication “Edible insects: future prospects of insects as food and feed” (VAN HUIS *et al.*, 2013). The sudden interest in alternative proteins was very likely triggered by environmental concerns about meat production. The academic interest is increasing: More than 85% of all publications on edible insects have been published during the last six years. Concerning the market: in 2021, 54% of insect products went to pets and 17% to aquafeed; in 2030 this will be 30 and 40%, respectively; for poultry it remains at 25% and for pigs 4% (DE JONG and NIKOLIK, 2021). One problem is the high price, but it is expected that it will go down in this period by about 50%.

We need alternative protein sources because the land area for livestock (now 80%) cannot satisfy the increasing demand. Moreover, livestock contributes to 15% of all greenhouse gas (GHG) emissions, beef having the highest impact in terms of GHG emissions and land use. The production of insects produces less GHG and requires less land and water than the production of meat (MIGLIETTA *et al.*, 2015; OONINCX and DE BOER, 2012). Another big advantage of insects is that they can bio-transform organic waste into high value protein. Also, it seems that polystyrene can be degraded by the yellow mealworm and black soldier fly (BSF) larvae and their gut microbes. Any kind of organic waste can be handled by the BSF larvae, even manure, although this is not yet allowed in the EU.

Up till now no diseases have been detected for the BSF (JOOSTEN *et al.*, 2020). For crickets however, many viruses are present, although it is possible to shift to other cricket species not susceptible to a particular disease. There is now an EU project that is training approx. 15 PhD students in veterinary science for insects.

The nutritional value of insect products is comparable to meat products, and there may be health benefits for humans (VAN HUIS *et al.*, 2021). There are also health benefits for animals. For example, from BSF larvae 68 anti-microbial compounds (AMPs) have been found, of which 57 have antimicrobial, antiviral, and/or antifungal activity (MORETTA *et al.*, 2020). No drug resistance has been found among bacteria in livestock, and it may therefore be an interesting alternative to antibiotics in animal diets (XIA *et al.*, 2021).

Depending on the animal species, fishmeal or soy can be partially replaced by insects (VAN HUIS and GASCO, 2023). Insect frass not only has an effect as fertilizer, but it also increases crop resistance through the beneficial effect of insects’ exuviae and frass on soil microbes (BARRÁGAN-FONSECA *et al.*, 2022).

The price of insects as animal feed is still too high; it would be better to eat mealworms directly instead of eating chickens fed with mealworms. However, the price will come down, depending mainly on whether cheap and reliable quantities of unused side-streams are available in large quantities.

Concerning consumer attitudes, the main challenge is persuading consumers to go from the occasional snack to including insects as a regular part of their diet. About 20-

25% of Western consumers are willing to try insect-based products. As disgust is the main problem, it has been suggested to target people who have low levels of disgust and high levels of sensation-seeking. Other strategies to convince consumers are deliciousness, providing information, giving people a taste experience, and disguising the product in familiar products such as bread, pastas, burgers, sausages, etc. The sustainability argument does not seem to convince the consumer.

Processing can be done by dehydrating, roasting and grinding the insect into powder/flour. A thermal treatment is necessary for decontamination. The powdered food can be added to crackers, pasta, energy bars (5-20% crickets), snacks, burgers, meatballs (REVERBERI, 2021). A problem to be solved is the lipid content, which influences flavor and odor. Also the proteins, fat and chitin can be isolated using several pathways (EL HAJJ *et al.*, 2022). There are several industrial applications apart from using the insects as food and feed: biodiesel or fuel from BSF lipids, cosmetic and skincare products from purified BSF fat to improve skin conditions such as smoothing, revitalizing, moisturizing, and tightening (VAN HUIS, 2022b).

Concerning food safety, bioaccumulation may occur, such as cadmium in BSF larvae and arsine in the yellow mealworm, a feature which can also be used in bioremediation procedures. Mycotoxins and polycyclic aromatic hydrocarbons do not seem to accumulate, and mycotoxins and some veterinary drugs can be degraded by insects (ALAGAPPAN *et al.*, 2022) with the help of symbiotic microbes. Concerning biological contaminants, some bacteria may be dangerous, while we do not know much about fungi, viruses, protozoa and prions. Processing can reduce pathogens. Legislation is becoming increasingly conducive in the EU: insects were allowed for aquafeed in 2017, and for poultry and pigs in 2021. Manure (although it can reduce ammonia pollution) and catering waste are not yet allowed to be used as substrate for insects to be used as feed. Since 2022, several insect products have been allowed as food, *i.e.* those containing house cricket, yellow mealworm and migratory locust.

Insect welfare needs to be taken seriously as more evidence is starting to emerge about insects as ‘sentient beings’. The sector of insects as food and feed is progressing rapidly and depends also on the (inter)national collaboration between research, private enterprise and the government. This promotes innovation, attracts talent and devises solutions for the challenges of tomorrow (VAN HUIS, 2022a).

## REFERENCES

- ALAGAPPAN S., ROWLAND D., BARWELL R., COZZOLINO D., MIKKELSEN D., OLARTE MANTILLA S.M., JAMES P., YARGER O., HOFFMAN L., 2022. - *Organic side streams (bioproducts) as substrate for black soldier fly (Hermetia illucens) intended as animal feed: chemical safety issues.* - *Animal Production Science*, 62: 1639–1651.
- BARRÁGAN-FONSECA K.Y., NURFIKARI A., VAN DER ZANDE E.M., WANTULLA M., VAN LOON J.J.A., DE BOER W., DICKE M., 2022. - *Insect frass and exuviae to promote plant growth and health.* - *Trends in plant science*, 27: 646-654.
- DE JONG B., NIKOLIK G., 2021. - *No Longer Crawling: Insect Protein to Come of Age in the 2020s.* Rabobank. [https://www.allaboutfeed.net/wp-content/uploads/2021/03/Rabobank\\_No-Longer-Crawling-Insect-Protein-to-Come-of-Age-in-the-2020s.pdf](https://www.allaboutfeed.net/wp-content/uploads/2021/03/Rabobank_No-Longer-Crawling-Insect-Protein-to-Come-of-Age-in-the-2020s.pdf).
- EL HAJJ R., MHEMDI H., BESOMBES C., ALLAF K., LEFRANÇOIS V., VOROBIEV E., 2022. - *Edible Insects’ transformation for feed and food uses: An overview of current insights and future developments in the field.* – *Processes*, 10: 970.
- JOOSTEN L., LECOCQ A., JENSEN A.B., HAENEN O., SCHMITT E., EILENBERG J., 2020. - *Review of insect pathogen risks for the black soldier fly (Hermetia illucens) and guidelines for reliable production.* - *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 168: 432-447.
- MIGLIETTA P.P., LEO F.D., RUBERTI M., MASSARI S., 2015. - *Mealworms for food: A water footprint perspective.* - *Water*, 7: 6190-6203.
- MORETTA A., SALVIA R., SCIEUZO C., DI SOMMA A., VOGEL H., PUCCI P., SGAMBATO A., WOLFF M., FALABELLA P., 2020. - *A bioinformatic study of antimicrobial peptides identified in the black soldier fly (BSF) Hermetia illucens (Diptera: Stratiomyidae).* - *Scientific Reports*, 10: 16875.
- OONINCX D., DE BOER I., 2012. - *Environmental Impact of the production of mealworms as a protein source for humans – A life cycle assessment.* - *Plos One*, 7: e51145.
- REVERBERI M., 2021. - *The new packaged food products containing insects as an ingredient.* - *Journal of Insects as Food and Feed*, 7: 901–908. 10.3920/JIFF2020.0111
- VAN HUIS A., 2022a. - *Edible insects: Challenges and prospects.* - *Entomological research* 25: 161-177. <https://doi.org/10.1111/1748-5967.12582>
- VAN HUIS A., 2022b. - *Edible insects: non-food and non-feed industrial applications.* - *Journal of Insects as Food and Feed*, 8: 447-450. 10.3920/JIFF2022.x004
- VAN HUIS A., GASCO L., 2023. - *Insects as feed for livestock production.* - *Science*, 379: 138-139.
- VAN HUIS A., VAN ITTERBEECK J.V., KLUNDER H., MERTENS E., HALLORAN A., MUIR G., VANTOMME P., 2013. - *Edible insects: Future prospects for food and feed security.* FAO Forestry Paper 171. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome and Wageningen University and Research Centre, the Netherlands. 187 pp.
- VAN HUIS A., RUMPOLD B., MAYA C., ROOS N., 2021. - *Nutritional qualities and enhancement of edible insects.* - *Annual Review of Nutrition*, 41: 551-576.
- XIA J., GE C., YAO H., 2021. - *Antimicrobial peptides from black soldier fly (Hermetia illucens) as potential antimicrobial factors representing an alternative to antibiotics in livestock farming.* - *Animals*, 11: 10.3390.

## STUDIO DELLA FISIOLOGIA DELL'INTESTINO MEDIO DI *HERMETIA ILLUCENS*

MORENA CASARTELLI <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Dipartimento di Bioscienze, Università degli Studi di Milano

Via Celoria 26, 20133 Milano, Italy. E-mail: [morena.casartelli@unimi.it](mailto:morena.casartelli@unimi.it)

Lettura tenuta durante la Tavola Rotonda “Edible insects: from biology to applications”. Seduta pubblica dell'Accademia – Firenze, 18 novembre 2022.

### *Insights into the physiology of Hermetia illucens midgut*

The larvae of *Hermetia illucens* (Diptera, Stratiomyidae) are promising agents of bioconversion and valorisation of organic waste and by-products of the agri-food production chain. From the insect biomass significant amount of proteins, lipids, and bioactive molecules, such as antimicrobial peptides and chitin, can be obtained and used as raw materials or additives for the production of feed for monogastric animals, bioplastics, biodiesel, cosmetics or medical products. Therefore, this insect is suitable to build circular economy supply chains and make waste management and production processes increasingly sustainable. Solid knowledge about the physiology of the larvae and, in particular, about the morphofunctional features of the midgut, which is the organ directly involved in digestion and absorption of nutrients, is essential to improve their bioconversion capabilities. For this reason, we performed an in depth characterization of the larval midgut. Our studies showed that the midgut is an extremely complex organ that has a strong morphofunctional regionalization and is able to set in motion post-ingestion regulatory mechanisms to exploit nutritionally poor rearing substrates. This functional plasticity contributes to the capability of these larvae to grow on a variety of feeding substrates even when their nutritional content is low. We also characterized the midgut microbiota. We demonstrated that the diet as well as the physico-chemical features of the three regions in which the midgut can be divided strongly shape the residing microbiota and that the bacterial community present in the posterior tract of the midgut could play a relevant role in the host physiology. With the aim of having a complete picture of the digestive system of *H. illucens*, we also analyzed its characteristics in the adult insect. Although the literature frequently reports that *H. illucens* flies are not able to eat, our data unequivocally demonstrated that they possess a functional digestive system and that food administration affects their longevity. These data open up the possibility to manipulate the feeding substrate of the fly to improve its performances in mass rearing procedures.

KEY WORDS: Black soldiers fly, bioconversion, midgut physiology, microbiota

Le larve di *Hermetia illucens* (Diptera, Stratiomyidae) (Fig. 1) sono considerate promettenti agenti di bioconversione e valorizzazione di rifiuti organici e sottoprodotti della filiera agroalimentare perché sono saprofaghe, hanno un elevato tasso di consumo del substrato di crescita e un rapido sviluppo. Inoltre, dalle larve mature è possibile estrarre significative quantità di proteine, lipidi e molecole bioattive, come peptidi antimicrobici o chitina, che possono essere impiegate come materie prime o additivi (a seconda del tipo di substrato utilizzato per allevare l'insetto, nel rispetto delle normative vigenti) per la produzione di mangimi per animali monogastrici, bioplastica, biodiesel, cosmetici o prodotti medicali (SURENDRA *et al.*, 2020; SIDDIQUI *et al.*, 2022). Inoltre, il residuo dell'allevamento può essere valorizzato come fertilizzante organico o per la produzione di biogas (SURENDRA *et al.*, 2020). Questo insetto offre quindi l'opportunità di creare filiere di economia circolare per rendere la gestione di rifiuti e sottoprodotti, così come i processi produttivi sempre più sostenibili, in linea con la strategia “Farm to Fork”, uno dei pilastri del Green Deal europeo (CAPPELLOZZA *et al.*, 2019).

Circa sette anni fa, quando il nostro gruppo di ricerca ha iniziato a studiare questo insetto in collaborazione con quello del prof. Gianluca Tettamanti dell'Università dell'Insubria, erano note poche informazioni sulla sua fisiologia. In letteratura erano riportate informazioni essenzialmente sui metodi per allevare questo dittero, sull'efficienza delle larve di biotrasformare differenti tipologie di scarti e rifiuti, sulla composizione chimica delle larve in funzione della tipologia di substrato di crescita e sulle pos-



Fig. 1 - Larve di *Hermetia illucens*

sibili applicazioni delle macromolecole estratte dall'insetto. Abbiamo quindi focalizzato l'attenzione sull'apparato digerente e, in particolare, sull'intestino medio, ossia la regione deputata alla digestione e all'assorbimento dei nutrienti e, pertanto, direttamente responsabile del processo di bioconversione. Infatti, solo attraverso un'approfondita conoscenza di questo organo è possibile comprendere le basi fisiologiche della straordinaria plasticità alimentare di queste larve e sfruttarne al meglio la capacità di bioconversione.

In primo luogo abbiamo eseguito una fine caratterizzazione morfofunzionale dell'intestino medio delle larve di *H. illucens* (BONELLI *et al.*, 2019) allevate su dieta standard, una dieta ottimale per il loro sviluppo, contenente crusca di frumento, farina di mais ed erba medica (HOGSETTE, 1992). Da questo studio è emerso che l'intestino medio è estremamente complesso e può essere suddiviso in tre tratti – anteriore, intermedio e posteriore – ognuno dei quali presenta specifiche caratteristiche morfologiche e funzionali. Il tratto anteriore, che ha un pH luminale debolmente acido, è costituito da cellule colonnari con caratteristiche ultrastrutturali tipiche delle cellule secretorie (reticolo endoplasmatico rugoso molto sviluppato, numerosi mitocondri e vescicole nella porzione apicale della cellula). In questo tratto sono attive amilasi e lipasi in grado di digerire, rispettivamente, polisaccaridi e lipidi. Il tratto intermedio può essere suddiviso in due porzioni: la prima, piuttosto breve, presenta un epitelio in cui sono presenti le cellule cuprofiliche, nella membrana apicale di queste cellule si trova una proteina che media il trasporto attivo di ioni  $H^+$  nel lume ( $H^+$  V-ATPasi) responsabile del pH fortemente acido presente nel lume tratto intermedio dell'intestino medio; nella seconda porzione l'epitelio è formato da cellule piuttosto appiattite, il lume intestinale è più ampio rispetto a quello degli altri tratti e l'unica attività enzimatica presente è quella del lisozima. Le caratteristiche dell'intestino intermedio appena descritte, in particolare il pH luminale estremamente acido (intorno a 2 unità di pH) e la presenza del lisozima, suggeriscono che questo tratto abbia l'importante ruolo di uccidere i microrganismi patogeni ingeriti con la dieta. Anche il tratto posteriore dell'intestino medio, che è il più esteso dei tre e presenta un lume alcalino, può essere suddiviso in due porzioni: la prima presenta cellule colonnari con caratteristiche simili a quelle del tratto anteriore; nella seconda le cellule colonnari hanno microvilli più sviluppati di quelli presenti negli altri tratti, caratteristica che indica un importante ruolo del tratto posteriore dell'intestino medio nell'assorbimento dei nutrienti. Inoltre, qui avviene la digestione delle proteine grazie all'attività di endopeptidasi, in particolare serin-proteasi come tripsina e chimotripsina, ed esopeptidasi, come amminopeptidasi, ancorate alla membrana apicale delle cellule colonnari, e prosegue la digestione di polisaccaridi e lipidi grazie ad amilasi e lipasi. Il tratto posteriore è quindi la principale sede della digestione e dell'assorbimento dei nutrienti. Dalla caratterizzazione dell'intestino medio delle larve di *H. illucens* è emerso che questo organo è estremamente complesso e presenta una forte “regionalizzazione” morfofunzionale (Fig. 2).

Questo primo studio ha rappresentato il punto di partenza per indagare se le larve di *H. illucens* siano in grado di sfruttare substrati di crescita poveri dal punto di vista nutrizionale grazie a meccanismi di regolazione post-ingestione messi in atto dall'intestino medio. Infatti, l'efficacia di questi meccanismi, unita alla capacità di regolare l'ingestione di cibo, sono fondamentali per poter compensare la variabilità nella composizione della dieta e soddisfare le esigenze nutrizionali dell'insetto. Le larve sono state quindi allevate con dieta standard, utilizzata come controllo, e con una dieta contenente solo frutta e verdura, un substrato di crescita che mima uno scarto della filiera agroalimentare e con un ridotto contenuto di proteine, lipidi e carboidrati rispetto alla dieta standard (BONELLI *et al.*, 2020). Sebbene le larve abbiano performance di crescita migliori su quest'ultima in termini di durata dello stadio larvale e massimo peso raggiunto prima dell'impupamento, non si sono osservate differenze nella sopravvivenza delle larve e nel numero di adulti sfarfallati con le due diete. Lo studio da noi eseguito ha messo in evidenza che le larve, attraverso la modulazione dell'attività dell'intestino medio, sono in grado di sfruttare efficacemente substrati di crescita poveri dal punto di vista nutrizionale (BONELLI *et al.*, 2020). In particolare, abbiamo osservato che l'attività digestiva viene finemente regolata: l'attività delle proteasi (endopeptidasi e esopeptidasi) aumenta in modo significativo quando le larve sono allevate con dieta contenente solo frutta e verdura rispetto a quanto osservato con dieta standard. Questo dato suggerisce che l'insetto riesce a ottenere un adeguato apporto di amminoacidi anche se allevato con una dieta povera di proteine grazie alla modulazione degli enzimi coinvolti nella loro digestione. L'analisi trascrittomica ha confermato che molti geni che codificano per enzimi coinvolti nella digestione delle proteine sono sovraespressi nelle larve alimentate con la dieta contenente solo frutta e verdura. Inoltre, queste larve mostrano adattamenti morfologici dell'epitelio del tratto posteriore dell'intestino medio, quello maggiormente coinvolto nei processi di assorbimento dei nutrienti. In particolare i microvilli delle cellule colonnari risultano più allungati rispetto a quanto osservato nel medesimo tratto delle larve allevate su dieta standard. Questa evidenza indica una maggiore superficie a disposizione per i processi di assorbimento. Possiamo concludere che l'intestino medio delle larve di *H. illucens* è un organo funzionalmente plastico che sicuramente contribuisce alla capacità di questo insetto di sfruttare efficacemente substrati di crescita con contenuti nutrizionali diversi. Intendiamo proseguire la ricerca caratterizzando i meccanismi biochimici e molecolari alla base della plasticità dell'intestino medio. Questi meccanismi possono coinvolgere altri tessuti, come il corpo grasso e il sistema nervoso, ma anche il microbiota intestinale che potrebbe svolgere un ruolo importante nei processi digestivi e nel supportare la larva dal punto di vista nutrizionale.

Nei nostri studi sulla caratterizzazione funzionale dell'intestino medio delle larve di *H. illucens* abbiamo considerato anche il microbiota intestinale (BRUNO *et al.*,



2019b). In particolare, abbiamo analizzato l'effetto di tre diverse diete (dieta standard, dieta contenente solo frutta e verdura, dieta con elevato contenuto proteico contenente farina di pesce) sulla composizione del microbiota presente nei tre tratti in cui è possibile suddividere l'intestino medio (anteriore, intermedio e posteriore). Infatti, non solo la composizione della dieta, ma anche le diverse caratteristiche chimico-fisiche presenti in queste tre regioni potrebbero avere un forte impatto sulla composizione della comunità batterica intestinale. I nostri risultati hanno effettivamente messo in evidenza che il microbiota è influenzato dalle caratteristiche dei tre tratti dell'intestino medio. In particolare, per tutte le diete la carica batterica è simile nelle regioni anteriore e intermedia, mentre aumenta nel tratto posteriore dell'intestino medio. Inoltre, per tutte le diete il tratto anteriore è caratterizzato dalla più alta diversità batterica la quale progressivamente diminuisce andando verso il tratto posteriore, dove probabilmente ci sono le condizioni ottimali per la crescita di una comunità batterica composta da un numero relativamente limitato di specie che possono essere considerate i veri simbiotici di questo insetto. È possibile che il pH fortemente acido e l'attività del lisozima presenti nel

lume del tratto intermedio svolgano un ruolo importante in questo processo di selezione. Per quanto riguarda la composizione del microbiota, i *phyla* con il maggior numero di specie nei tre tratti dell'intestino medio delle larve allevate con dieta standard e con dieta contenente solo frutta e verdura sono gli stessi e hanno abbondanze relative simili (il *phylum* dominante è *Bacteroidetes*), mentre i *phyla* prevalenti nelle larve allevate con dieta contenente farina di pesce sono *Proteobacteria* e *Firmicutes*. Anche scendendo a un rango tassonomico inferiore, il genere, nel tratto posteriore dell'intestino medio le larve allevate con dieta standard o con dieta contenente frutta e verdura hanno un microbiota simile, mentre nelle larve allevate con dieta contenente farina di pesce il microbiota presenta una composizione completamente diversa, in cui proteobatteri del genere *Providencia* rappresentano il *taxon* con la maggiore abbondanza relativa. Poiché molti patogeni opportunisti appartengono a questo genere, non si può escludere che diete contenenti elevate quantità di proteina, come quella utilizzata in questo studio in cui le proteine rappresentano più del 60% del peso secco, possano causare disbiosi nelle larve, ipotesi supportata anche dalla ridotta performance di crescita dell'insetto

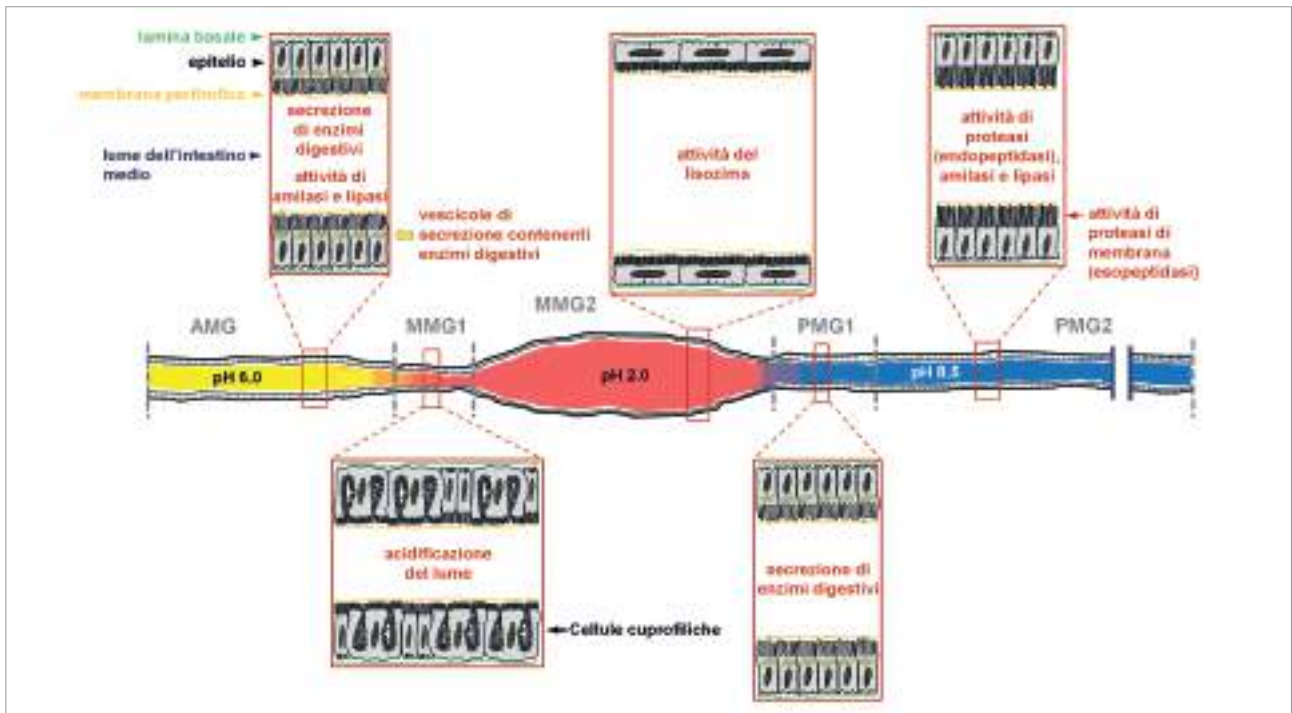


Fig. 2 - Rappresentazione schematica dell'intestino medio delle larve di *H. illucens* in cui sono riportate le principali caratteristiche morfofunzionali dei tre tratti in cui questo organo può essere suddiviso. Il tratto anteriore dell'intestino medio (AMG), che ha un pH luminale acido, è caratterizzato da cellule colonnari con attività secretoria; in questa regione inizia la digestione di polisaccaridi e lipidi grazie all'attività, rispettivamente, di amilasi e lipasi. Le cellule cuprofiliche, localizzate nella prima porzione del tratto intermedio (MMG1), sono responsabili del pH fortemente acido del lume intestinale di questa regione; l'epitelio della seconda porzione del tratto intermedio (MMG2) è formato da cellule appiattite, qui non avvengono processi digestivi, ma l'attività del lisozima e il pH acido (pH = 2) del lume potrebbero rivestire un ruolo importante nell'uccidere i microrganismi patogeni ingeriti con la dieta. Il tratto posteriore dell'intestino medio è coinvolto nella digestione delle proteine grazie alla presenza di endopeptidasi e esopeptidasi, ed è responsabile dell'ulteriore digestione di polisaccaridi e lipidi. La prima porzione di questo tratto (PMG1) è caratterizzata da cellule colonnari con attività secretoria, mentre la seconda (PMG2) presenta cellule colonnari con microvilli più lunghi rispetto a quelli degli altri tratti, evidenza che suggerisce un importante ruolo di queste cellule nell'assorbimento dei nutrienti. Modificato da BONELLI *et al.*, 2019.

su questa dieta. Questo è un aspetto importante che deve essere considerato nella formulazione di diete per l'allevamento massale di questo insetto. Questo studio, che è stato uno dei primi pubblicati sul microbiota intestinale delle larve di *H. illucens*, ha messo in evidenza che le proprietà chimico-fisiche dell'intestino medio condizionano la composizione della comunità batterica e che i batteri che risiedono nel tratto posteriore potrebbero avere un ruolo rilevante nella fisiologia dell'ospite, aspetto che merita ulteriori indagini.

Con l'obiettivo di avere un quadro completo sull'apparato digerente di *H. illucens*, abbiamo analizzato le sue caratteristiche anche nell'insetto adulto (BRUNO *et al.*, 2019a). Senza il supporto di studi morfologici e funzionali, in letteratura è frequentemente riportato che le mosche di questa specie (Fig. 3) non si nutrono, non possono essere quindi vettori di agenti patogeni, e che le loro performance dipendono esclusivamente dalle riserve accumulate durante lo stadio larvale (a titolo di esempio: GOBBI *et al.*, 2013; SHEPPARD *et al.*, 1994; SHEPPARD *et al.*, 2002; TOMBERLIN *et al.*, 2009; TOMBERLIN e SHEPPARD 2002; TOMBERLIN *et al.*, 2002). Solo un numero limitato di studi dimostra che la longevità e le performance riproduttive degli adulti dipendono dal tipo di substrato messo a loro disposizione (BERTINETTI *et al.*, 2019; LUPI *et al.*, 2019; NAKAMURA *et al.*, 2016), senza però esaminare le proprietà funzionali dell'apparato digerente di



Fig. 3 - Adulto di *Hermetia illucens*

questo stadio.

Le nostre ricerche (BRUNO *et al.*, 2019a) hanno dimostrato, utilizzando differenti approcci, che l'apparato digerente viene completamente rimodellato durante la metamorfosi e che l'insetto adulto è in grado di ingerire il cibo, il cibo ingerito transita lungo l'intestino e vengono eliminate le frass. Inoltre, nell'intestino medio dell'adulto sono attivi enzimi in grado di digerire proteine e zuccheri. Infine, abbiamo osservato che le mosche possono effettivamente sopravvivere senza nutrirsi, ma è possibile migliorare la durata dello stadio adulto e le performance riproduttive se l'insetto viene alimentato con sostanze zuccherine. Questi dati non solo dimostrano che l'adulto di *H. illucens* è in grado di nutrirsi perché dotato di un canale alimentare perfettamente funzionale, ma mettono in evidenza che è possibile migliorarne le performance riproduttive scegliendo adeguati substrati per la sua alimentazione, aspetto sicuramente rilevante

per l'allevamento massale di questo insetto. Una recente review mette proprio in evidenza l'importanza di studiare lo stadio adulto di *H. illucens* per sfruttare al meglio le potenzialità di questo insetto (LEMKE *et al.*, 2023).

Concludendo, è bene sottolineare l'importanza di proseguire gli studi sulla fisiologia dell'apparato digerente di *H. illucens* (TETTAMANTI *et al.*, 2022), ma più in generale sulla sua biologia, per rendere i processi di bioconversione mediati da questo insetto non solo efficienti ma anche sicuri. In particolare, considerando la natura dei substrati che possono essere utilizzati per l'allevamento delle larve è indispensabile valutare aspetti come la possibile presenza di contaminanti di origine biotica e abiotica nella dieta, la risposta dell'insetto a tali contaminanti, la sua capacità di accumulare molecole potenzialmente tossiche o veicolare agenti patogeni.

#### RIASSUNTO

Le larve di *Hermetia illucens* (Diptera, Stratiomyidae) sono considerate promettenti agenti di bioconversione e valorizzazione di rifiuti organici e sottoprodotti della filiera agroalimentare. Dalla biomassa ottenuta è possibile estrarre significative quantità di proteine, lipidi e molecole bioattive che trovano impiego in diversi ambiti, come la produzione di mangimi per animali monogastrici, bioplastica, biodiesel, cosmetici o prodotti medicinali. Questo insetto offre quindi l'opportunità di creare filiere di economia circolare per rendere la gestione di rifiuti e sottoprodotti, e i processi produttivi sempre più sostenibili. Per sfruttare al meglio la capacità di bioconversione di questo insetto è fondamentale disporre di solide conoscenze sulla sua fisiologia e, in particolare, sulle caratteristiche morfofunzionali dell'intestino medio, ossia l'organo direttamente coinvolto nella digestione e nell'assorbimento dei nutrienti. Dai nostri studi è emerso che l'intestino medio delle larve di *H. illucens* è un organo estremamente complesso che presenta una forte "regionalizzazione" morfofunzionale ed è in grado di mettere in atto meccanismi di regolazione post-ingestione che sono fondamentali per poter compensare la variabilità nella composizione della dieta. Questa plasticità funzionale garantisce di soddisfare le esigenze nutrizionali dell'insetto anche quando il substrato di crescita ha un ridotto contenuto nutrizionale. Nei nostri studi sulla caratterizzazione funzionale dell'intestino medio delle larve di *H. illucens* non poteva mancare il microbiota. Abbiamo dimostrato che la dieta così come le caratteristiche chimico-fisiche presenti nei differenti tratti dell'intestino medio condizionano la composizione del microbiota intestinale e che i batteri che risiedono nel tratto posteriore dell'intestino medio potrebbero avere un ruolo rilevante nella fisiologia dell'ospite. Con l'obiettivo di avere un quadro completo dell'apparato digerente di *H. illucens*, abbiamo analizzato le sue caratteristiche anche nell'insetto adulto. Sebbene in letteratura venga frequentemente riportato che la mosca non si alimenta, i nostri dati indicano non solo che il suo apparato digerente è perfettamente funzionale, ma mettono in evidenza

che è possibile migliorarne le performance riproduttive scegliendo adeguati substrati per la sua alimentazione, aspetto sicuramente rilevante per l'allevamento massale di questo insetto.

#### BIBLIOGRAFIA

- BERTINETTI C., SAMAYOA A.C., HWANG S.Y., 2019 - *Effects of feeding adults of Hermetia illucens (Diptera: Stratiomyidae) on longevity, oviposition, and egg hatchability: insights into optimizing egg production.* - Journal of Insect Science, 19: 1-7, doi: 10.1093/jisesa/iez001
- BONELLI M., BRUNO D., BRILLI M., GIANFRANCESCO N., TIAN L., TETTAMANTI G., CACCIA S., CASARTELLI M., 2020 - *Black soldier fly larvae adapt to different food substrates through morphological and functional responses of the midgut.* - International Journal of Molecular Sciences, 21: 4955, doi: 10.3390/ijms21144955
- BONELLI M., BRUNO D., CACCIA S., SGAMBETTERRA G., CAPPELLOZZA S., JUCKER C., TETTAMANTI G., CASARTELLI M., 2019 - *Structural and functional characterization of Hermetia illucens larval midgut.* - Frontiers in Physiology, 10: 204, doi: 10.3389/fphys.2019.00204
- BRUNO D., BONELLI M., CADAMURO A.G., REGUZZONI M., GRIMALDI A., CASARTELLI M., TETTAMANTI G., 2019a - *The digestive system of the adult Hermetia illucens (Diptera: Stratiomyidae): morphological features and functional properties.* - Cell and Tissue Research, 378: 221-238, doi: 10.1007/s00441-091-03025-7
- BRUNO D., BONELLI M., DE FILIPPIS F., DI LELIO I., TETTAMANTI G., CASARTELLI M., ERCOLINI D., CACCIA S., 2019b - *The intestinal microbiota of Hermetia illucens larvae is affected by diet and shows a diverse composition in the different midgut regions.* - Applied and Environmental Microbiology, 85: e01864-18, doi: 10.1128/AEM.01864-18
- CAPPELLOZZA S., LEONARDI M.G., SAVOLDELLI S., CARMINATI D., RIZZOLO A., CORTELLINO G., TEROVA G., MORETTO E., BADAILE A., CONCHERI G., SAVIANE A., BRUNO D., BONELLI M., CACCIA S., CASARTELLI M., TETTAMANTI G., 2019 - *A first attempt to produce proteins from insects by means of a circular economy.* - Animals, 9: 278, doi: 10.3390/ani9050278
- GOBBI P., MARTINEZ-SANCHEZ A., ROJO S., 2013 - *The effects of larval diet on adult life-history traits of the black soldier fly, Hermetia illucens (Diptera: Stratiomyidae).* - European Journal of Entomology, 110: 461-468, doi: 10.14411/eje.2013.061
- HOGSETTE J.A., 1992 - *New diets for production of houseflies and stable flies (Diptera, Muscidae) in the laboratory.* - Journal of Economic Entomology, 85: 2291-2294, doi: 10.1093/jee/85.6.2291
- LEMKE N.B., DICKERSON A.J., TOMBERLIN J.K., 2023 - *No neonates without adults. A review of adult black soldier fly biology, Hermetia illucens (Diptera: Stratiomyidae).* - BioEssay, 45: 2200162 doi: 10.1002/bies.202200162
- LUPI D., LEONARDI M.G., JUCKER C., 2019 - *Feeding in the adult of Hermetia illucens (Diptera Stratiomyidae): reality or fiction?* - Journal of Entomological and Acarological Research, 51: 27-32, doi: 10.4081/jeur.2019.8046
- NAKAMURA S., ICHIKI R.T., SHIMODA M., MORIOKA S., 2016 - *Small-scale rearing of the black soldier fly, Hermetia illucens (Diptera: Stratiomyidae), in the laboratory: low-cost and year-round rearing.* - Applied Entomology and Zoology, 51: 161-166, doi: 10.1007/s13355-015-0376-1
- SHEPPARD D.C., NEWTON G.L., THOMPSON S.A., SAVAGE S., 1994 - *A value added manure management system using the black soldier fly.* - Bioresource Technology, 50: 275-279, doi: 10.1016/0960-8524(94)90102-3
- SHEPPARD D.C., TOMBERLIN J.K., JOYCE J.A., KISER B.C., SUMNER S.M., 2002 - *Rearing methods for the black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae).* - Journal of Medical Entomology, 39: 695-698, doi: 10.1603/0022-2585-39.4.695
- SIDDIQUI S.A., RISTOW B., RAHAYU T., PUTRA N.S., YUWONO N.W., NISA' K., MATEGEKO B., SMETANA S., SAKI M., NAWAZ A., NAGDALIAN A., 2022 - *Black soldier fly larvae (BSFL) and their affinity for organic waste processing.* - Waste Management, 140: 1-13, doi: 10.1016/j.wasman.2021.12.044
- SURENDRA K.C., TOMBERLIN J.K., VAN HUIS A., CAMMACK J.A., HECKMANN L.L., KHANAL S.K., 2020 - *Rethinking organic wastes bioconversion: Evaluating the potential of the black soldier fly (Hermetia illucens (L.) (Diptera: Stratiomyidae) (BSF)).* - Waste Management, 117: 58-80, doi: 10.1016/j.wasman.2020.07.050
- TETTAMANTI G., VAN CAMPENHOUT L., CASARTELLI M., 2022 - *A hungry need for knowledge on the black soldier fly digestive system.* - Journal of Insects as Food and Feed, 8: 217-222, doi: https://doi.org/10.3920/JIFF2022.X002
- TOMBERLIN J.K., SHEPPARD D.C., 2002 - *Factors influencing mating and oviposition of black soldier flies (Diptera: Stratiomyidae) in a colony.* - Journal of Entomological Science, 37: 345-352, doi: 10.18474/0749-8004-37.4.345
- TOMBERLIN J.K., SHEPPARD D.C., JOYCE J.A., 2002 - *Selected life-history traits of black soldier flies (Diptera: Stratiomyidae) reared on three artificial diets.* - Annals of the Entomological Society of America, 95: 379-386, doi: 10.1603/0013-8746(2002)095[0379:SLH-TOB]2.0.CO;2
- TOMBERLIN J.K., ADLER P.H., MYERS H.M., 2009 - *Development of the black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) in relation to temperature.* - Environmental Entomology, 38: 930-934, doi: 10.1603/022.038.0347



## IL SISTEMA IMMUNITARIO DELLA MOSCA SOLDATO, *HERMETIA ILLUCENS*

GIANLUCA TETTAMANTI <sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Dipartimento di Biotecnologie e Scienze della Vita, Università degli Studi dell'Insubria*

*Via J.H., Dunant, 3 - 21100, Varese, Italia.* E-mail: gianluca.tettamanti@uninsubria.it

Lettura tenuta durante la Tavola Rotonda “Edible insects: from biology to applications”. Seduta pubblica dell'Accademia – Firenze, 18 novembre 2022.

### *Defense against bacterial pathogens: spotlight on the immune system of black soldier fly*

The larvae of *Hermetia illucens*, also known as black soldier fly (BSF), are gaining increasing interest worldwide for the biotransformation of organic waste. Since they live on decaying substrates, potentially rich in pathogens that can challenge their health status, growth, and reproductive performance, these larvae have presumably evolved a sophisticated and efficient immune system. This is a relevant topic, still poorly known, that can impact on the mass rearing of the larvae in production plants and can also affect the microbiological quality of the insect meal. Here we summarize the recent knowledge on the immune response of BSF larvae, focusing the attention on the two branches of the immune system, i.e., the cellular and the humoral response.

KEY WORDS: Hemocytes, *Hermetia illucens*, Humoral response, Insect-mediated bioconversion, Waste management

Le larve del dittero *Hermetia illucens*, comunemente noto come mosca soldato, vengono allevate su svariati rifiuti organici. Tali substrati, spesso in decomposizione, possono portare gli insetti a contatto con potenziali agenti patogeni, compromettendone lo stato di salute, la crescita e le prestazioni riproduttive, con conseguenti effetti negativi sulla qualità microbiologica della farina che viene ottenuta dalle larve. D'altra parte, il particolare stile di vita e il comportamento alimentare di queste larve hanno presumibilmente contribuito a plasmare l'evoluzione di un sistema immunitario sofisticato ed efficiente in questo insetto. Questi aspetti sono estremamente rilevanti nell'ottica di produrre farine di insetto microbiologicamente sicure per il settore della mangimistica e possono avere significative ricadute applicative per quanto concerne l'allevamento massale delle larve di *H. illucens* negli impianti produttivi (SURENDRA, *et al.*, 2020).

Sebbene negli ultimi anni il numero di articoli relativi a *H. illucens* sia cresciuto esponenzialmente (TETTAMANTI *et al.*, 2022), solo pochi hanno indagato i meccanismi utilizzati dalle larve per far fronte ai patogeni, focalizzando l'attenzione sui composti antimicrobici prodotti dalle larve (ELHAG *et al.*, 2017; MORETTA *et al.*, 2020; PARK *et al.*, 2015; VOGEL *et al.*, 2018) o esplorando i meccanismi che sottendono la risposta immunitaria (VON BREDOW *et al.*, 2022; ZDYBICKA-BARABAS *et al.*, 2017). Pertanto, questo aspetto rimane ancora largamente sconosciuto.

La risposta immunitaria degli insetti è basata su sofisticati meccanismi cellulari e umorali che vengono attivati dall'ingresso di patogeni nell'emocele in tempi rapidi e operano in sinergia per inattivare e rimuovere efficacemente gli agenti estranei (non self) dal corpo dell'animale. I principali protagonisti della risposta immunitaria

sistemica sono gli emociti, cellule circolanti coinvolte nella fagocitosi, incapsulamento e nodulazione di corpi estranei. Queste cellule sono supportate nella loro attività dal corpo grasso, un organo che svolge svariate funzioni, tra cui la produzione di peptidi antimicrobici e altre molecole solubili (ELEFThERIANOS *et al.*, 2021a; 2021b).

Il nostro gruppo di ricerca ha recentemente intrapreso una caratterizzazione delle componenti cellulare e umorale del sistema immunitario delle larve di *H. illucens*, esaminando inizialmente il ruolo e le modificazioni morfofunzionali degli emociti in risposta a infezione e, in secondo luogo, analizzando l'attività di alcuni componenti chiave della risposta umorale. A tale scopo, le larve sono state infettate con *Micrococcus luteus* ed *Escherichia coli*, due microrganismi che sono presenti nei substrati organici di scarto utilizzati per l'allevamento di queste larve, e rappresentano ottimi modelli per studiare la risposta immunitaria dell'insetto contro batteri Gram-positivi e Gram-negativi, o iniettate con bead cromatografiche di diverso tipo per esaminare il processo di incapsulamento. I risultati qui riportati in sintesi sono descritti nel dettaglio in due recenti pubblicazioni (BRUNO *et al.*, 2021; 2022).

Il confronto iniziale dell'attività antimicrobica dell'emolinfa tal quale, contenente gli emociti e la componente umorale, con quella dell'emolinfa privata degli emociti, in larve infettate con il mix batterico, ha dimostrato che: 1) è necessaria l'azione sinergica delle due componenti del sistema immunitario per ottenere una rimozione rapida e completa dei batteri, in quanto i fattori umorali da soli non sono in grado di eliminare completamente i batteri dal corpo dell'insetto anche in tempi lunghi; 2) *M. luteus*, e probabilmente i batteri Gram-positivi in genera-

le, è caratterizzato da una maggiore persistenza nel corpo dell'insetto rispetto a *E. coli*, come dimostrato dell'attività antimicrobica prolungata nel corso del tempo in presenza di questo batterio.

Queste evidenze preliminari hanno rappresentato la base di partenza per un'analisi dettagliata delle due componenti del sistema immunitario.

Per quanto riguarda la risposta cellulare, sono stati identificati sei tipi di emociti che collaborano nella risposta immunitaria di queste larve (Fig. 1, A-F). I proemociti rappresentano i precursori degli emociti differenziati, mentre plasmacociti, lamellociti, crystal cell, granulociti e adipoemociti costituiscono le cellule effettrici. I plasmacociti intervengono in risposta ai batteri attivando processi di fagocitosi in tempi rapidi dall'infezione, come dimostrato da esperimenti con batteri Gram-positivi e Gram-negativi fluorescenti che vengono fagocitati già cinque minuti dopo la loro iniezione nell'emocele (Fig. 1, G). Analisi di microscopia elettronica hanno confermato questa evidenza, consentendo di visualizzare le diverse fasi del processo di fagocitosi. L'attività fagocitaria aumenta progressivamente fino a un'ora, quando si osserva la completa rimozione dei batteri dall'emocele. Questa evidenza avvalorata i risultati relativi all'attività antimicrobica dell'emolinfa, sopra descritti, circa l'importanza della risposta cellulosa mediata per dare luogo a una difesa immunitaria rapida ed efficace. Inoltre, in accordo con quanto osservato per l'attività antimicrobica, i batteri Gram-positivi richiedono un lasso di tempo maggiore rispetto ai Gram-negativi per essere eliminati dall'insetto. Nel corso della risposta cellulosa mediata, si assiste a un turnover degli emociti. In particolare, le cellule già circolanti nell'emocele rispondono immediatamente all'infezione batterica attivando la fagocitosi. Completato il processo di fagocitosi, queste cellule vengono eliminate tramite apoptosi, come dimostrato dall'analisi morfologica degli emociti e dalle analisi al citofluorimetro che evidenziano un incremento del tasso apoptotico un'ora dopo l'inizio dell'infezione. A partire dalle due ore, inizia la produzione *ex novo* di emociti da parte degli organi ematopoietici, portando a un incremento del numero di cellule circolanti per meglio fronteggiare l'infezione, come dimostrato dagli esperimenti di proliferazione con marcatori mitotici (istone 3 fosforilato) (Fig. 1, H).

Gli emociti sono responsabili anche della rimozione di corpi estranei di grosse dimensioni che penetrano nell'emocele, tramite il processo di incapsulamento. Esperimenti con bead cromatografiche mostrano come l'incapsulamento coinvolga granulociti, plasmacociti e lamellociti. Queste cellule proliferano e i granulociti rilasciano i propri granuli citoplasmatici, contribuendo a richiamare le altre cellule verso il corpo estraneo. In tal modo, le varie tipologie di emociti formano una capsula multistratificata e compatta che circonda il corpo estraneo, isolandolo dal punto di vista trofico e portandolo a morte (Fig. 1, I, J). Il processo di incapsulamento prevede il supporto delle crystal cell, che proliferano e rilasciano le inclusioni cristalline citoplasmatiche per produrre

melanina a livello della capsula. Un aspetto importante è che la cinetica di incapsulamento e la deposizione di melanina per l'isolamento dell'agente estraneo sono influenzate significativamente dalla matrice e dalla carica della bead. Ad esempio, bead di agarosio, neutre, vengono solo parzialmente circondate dalle cellule immunitarie senza causare la produzione di melanina, mentre bead di Sephadex, cariche positivamente, sono completamente incapsulate dagli emociti e melanizzate.

Per quanto riguarda la risposta umorale sono state condotte analisi sul lisozima, un enzima in grado di idrolizzare il peptidoglicano, il componente principale della parete cellulare dei batteri Gram-positivi (ELEFTHERIANOS *et al.*, 2021a). L'attività di questo enzima aumenta progressivamente nel tempo a partire dal momento dell'infezione. Tale attività enzimatica è supportata dalla trascrizione negli emociti del gene che codifica per questo fattore, a tempi brevi dall'infezione. Va sottolineato che questo componente dell'attività umorale interviene più tardivamente rispetto all'attività cellulare, ma si protrae per tempi prolungati. Questa cinetica può essere spiegata con la necessità di rimuovere efficacemente *M. luteus* che, come riportato in precedenza, è più resistente all'attacco del sistema immunitario di *H. illucens*; in alternativa, l'attività del lisozima protratta nel tempo potrebbe consentire di prolungare la risposta immunitaria o di rispondere più rapidamente a una seconda infezione.

Una tempistica simile a quella del lisozima è stata osservata per i peptidi antimicrobici (AMPs), piccoli peptidi in grado di alterare l'integrità dei batteri portandoli a morte, contribuendo in tal modo all'attività antimicrobica del lisozima (ZHANG *et al.*, 2021). Nel dettaglio, sono stati analizzati negli emociti e nel corpo grasso i livelli di espressione di Dipterina e Defensina, due AMPs che sono attivi, rispettivamente, contro i batteri Gram-negativi e Gram-positivi. Gli emociti sintetizzano entrambi gli AMPs subito dopo l'infezione e questa prima fase di produzione di AMPs è supportata da una successiva, ma prolungata, produzione di AMPs nel corpo grasso. L'espressione prolungata della Defensina, che ha un'azione più marcata sui batteri Gram-positivi, avvalorata ulteriormente l'ipotesi di una maggiore resistenza di questi batteri nelle larve di *H. illucens*.

L'ultimo marcatore analizzato è il sistema della pro-fenolossidasi (proPO), una cascata enzimatica la cui attivazione culmina nella produzione di melanina (ELEFTHERIANOS *et al.*, 2021a). Inaspettatamente la dose di batteri utilizzata negli esperimenti precedenti determina l'inibizione di questo sistema enzimatico mentre, in presenza di una carica batterica più elevata, il sistema proPO viene attivato. Pertanto, sembra che, in presenza di una bassa concentrazione di batteri nell'emolinfa, il sistema proPO sia inibito attivamente e, in tal caso, altri mediatori del sistema immunitario quali emociti, lisozima e AMPs, vengano utilizzati per rispondere all'infezione. Oltre una determinata concentrazione soglia di batteri, il sistema proPO viene attivato, portando alla produzione e al rilascio di melanina nel corpo della larva per contrastare la massiccia infezione e supportare la risposta immunitaria.

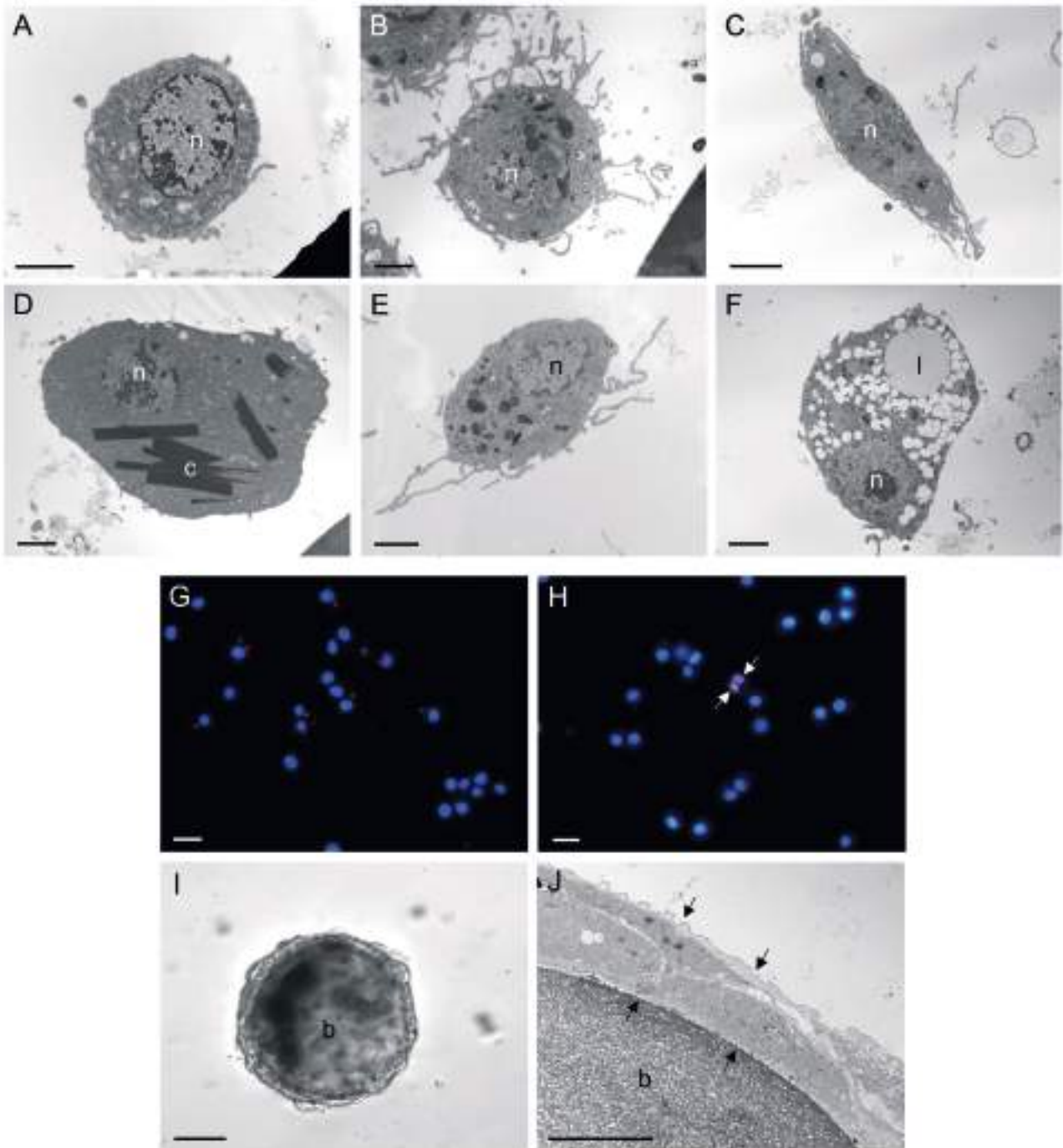


Fig. 1 - (A-F) Immagini in microscopia elettronica a trasmissione (TEM) delle diverse tipologie di emociti di *Hermetia illucens*: proemocita (A); plasmacocita (B); lamellocita (C); crystal cell (D); granulocita (E); adipoemocita (F). (G) Emociti impegnati nella fagocitosi di batteri fluorescenti (segnale rosso). (H). Emociti in fase di proliferazione (freccette). (I) Incapsulamento di una bead cromatografica di Sephadex (b) da parte dagli emociti. (J) Dettaglio al TEM di emociti (freccette) stratificati su una bead di Sephadex (b) durante il processo di incapsulamento. c: inclusioni cristalline; l: inclusioni lipidiche; n: nucleo.

Scale bar: 2  $\mu\text{m}$  (A-F); 10  $\mu\text{m}$  (G, H); 40  $\mu\text{m}$  (I); 5  $\mu\text{m}$  (J)

Questo meccanismo di protezione sembra necessario per impedire la produzione di melanina, se non strettamente necessaria, in quanto questo pigmento può risultare tossico per la larva stessa.

Un aspetto interessante, che necessita di ulteriori indagini, è che la risposta immunitaria di *H. illucens* è supportata dagli adipoemociti, una particolare tipologia di

emociti, finora poco caratterizzata negli insetti, che sembra essere deputata a sostenere dal punto di vista trofico le altre popolazioni emocitarie durante la loro azione.

Riassumendo, i dati ottenuti dalle indagini condotte dimostrano che:

- la risposta cellulare e umorale nelle larve di *H. illu-*

*cens* mostrano cinetiche diverse, con l'attivazione precoce di fagocitosi e incapsulamento dopo l'infezione batterica, seguito dall'intervento tardivo della componente umorale;

- nonostante i batteri Gram-positivi e Gram-negativi siano rimossi completamente dal corpo dell'insetto in poche ore dall'infezione, grazie all'azione combinata degli emociti e dei fattori umorali, i primi risultano avere una maggiore persistenza nell'emolinfa;

- le prime fasi della risposta cellulo-mediata coinvolgono diversi tipi di emociti che collaborano in una serie coordinata di processi (si veda, ad esempio, la risposta di incapsulamento).

Queste evidenze rappresentano importanti spunti per sviluppi futuri: i) tali informazioni ampliano le conoscenze sui sistemi di difesa di *H. illucens*, un aspetto praticamente sconosciuto fino a pochi anni fa; ii) questi studi costituiscono la base di partenza per intraprendere studi successivi sulla risposta delle larve di *H. illucens* all'attacco da parte di altri patogeni e agenti infettivi, quali funghi o virus; iii) una volta che questi dati saranno completati da informazioni sul ruolo dell'intestino nella difesa dell'insetto dai patogeni, si avrà la possibilità di indagare meglio la dinamica di questi agenti estranei all'interno della larva e di acquisire informazioni preziose sulla sicurezza degli insetti utilizzati a scopo alimentare; iv) tali risultati rappresentano un prerequisito fondamentale per manipolare la risposta immunitaria delle larve tramite fattori ambientali o nutrizionali, al fine di aumentare la loro resistenza ai patogeni, nonché di ottimizzare il loro stato di salute in condizioni di allevamento massale. A tal proposito, dati ottenuti nel nostro laboratorio e recenti pubblicazioni (VOGEL *et al.*, 2018; CANDIAN *et al.*, 2022; CANDIAN *et al.*, 2023) mostrano come l'attività antimicrobica della larva e l'espressione di AMPs possano essere modulati dal substrato alimentare fornito all'insetto. Questi risultati aprono prospettive per quanto riguarda una possibile manipolazione della risposta immunitaria di *H. illucens* attraverso la dieta, con effetti benefici sulle larve.

#### RIASSUNTO

Le larve di *Hermetia illucens*, nota anche come mosca soldato nera, stanno riscontrando un crescente interesse a livello mondiale per quanto riguarda le applicazioni legate alla bioconversione dei rifiuti organici. Poiché questi insetti vivono all'interno di substrati in decomposizione, potenzialmente ricchi di patogeni che possono compromettere il loro stato di salute, crescita e riproduzione, queste larve hanno sviluppato molto probabilmente un sistema immunitario sofisticato ed efficiente. Questo è un aspetto rilevante, finora poco studiato, che può avere un impatto sull'allevamento massale delle larve negli impianti produttivi e può influenzare la qualità microbiologica della farina prodotta dall'insetto. In questo articolo viene presentata una sintesi delle conoscenze relative alla risposta immunitaria delle larve di questo dittero, con-

centrando l'attenzione sulle due componenti principali del sistema immunitario, ovvero la risposta cellulare e quella umorale.

#### BIBLIOGRAFIA

- BRUNO D., MONTALI A., GARIBOLDI M., WROŃSKA A.K., KACZMAREK A., MOHAMED A., TIAN L., CASARTELLI M., TETTAMANTI G., 2022 - *Morphofunctional characterization of hemocytes in black soldier fly larvae*. - Insect Sci., 2022 Sep 5. doi: 10.1111/1744-7917.13111. Epub ahead of print.
- BRUNO D., MONTALI A., MASTORE M., BRIVIO M.F., MOHAMED A., TIAN L., GRIMALDI A., CASARTELLI M., TETTAMANTI G., 2021 - *Insights into the immune response of the black soldier fly larvae to bacteria*. - Front. Immunol., 12: 745160.
- CANDIAN V., MENEGUZ M., TEDESCHI R., 2023 - *Immune responses of the black soldier fly *Hermetia illucens* (L.) (Diptera: Stratiomyidae) reared on catering waste*. - Life, 13: 213.
- CANDIAN V., SAVIO C., MENEGUZ M., GASCO L., TEDESCHI R., 2022 - *Effect of the rearing diet on gene expression of antimicrobial peptides in *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae)*. - Insect Sci., 2022 Dec 21. doi: 10.1111/1744-7917.13165. Epub ahead of print.
- ELEFATHERIANOS I., HERYANTO C., BASSAL T., ZHANG W., TETTAMANTI G., MOHAMED A., 2021a - *Haemocyte-mediated immunity in insects: cells, processes and associated components in the fight against pathogens and parasites*. - Immunology, 164: 401-432.
- ELEFATHERIANOS I., ZHANG W., HERYANTO C., MOHAMED A., CONTRERAS G., TETTAMANTI G., WINK M., BASSAL T., 2021b - *Diversity of insect antimicrobial peptides and proteins - a functional perspective: A review*. - Int. J. Biol. Macromol., 191: 277-287.
- ELHAG O., ZHOU D., SONG Q., SOOMRO A.A., CAI M., ZHENG L., YU Z., ZHANG J., 2017 - *Screening, expression, purification and functional characterization of novel antimicrobial peptide genes from *Hermetia illucens* (L.)*. - PLoS One, 12: e0169582.
- MORETTA A., SALVIA R., SCIEUZO C., DI SOMMA A., VOGEL H., PUCCI P., SGAMBATO A., WOLFF M., FALABELLA P., 2020 - *A bioinformatic study of peptides identified in the Black Soldier Fly (BSF) *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae)*. - Sci. Rep., 10: 16875.
- PARK S.I., KIM J.W., YO E S.M., 2015 - *Purification and characterization of a novel antibacterial peptide from black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae*. - Dev. Comp. Immunol., 52: 98-106.
- SURENDRA K.C., TOMBERLIN J.K., VAN HUIS A., CAMMACK J.A., HECKMANN L.L., KHANAL S.K., 2020 - *Rethinking organic wastes bioconversion: evaluating the potential of the black soldier fly (*Hermetia illucens* (L.) (Diptera: Stratiomyidae) (BSF))*. - Waste Manag., 117: 58-80.
- TETTAMANTI G., VAN CAMPENHOUT L., CASARTELLI M., 2022 - *A hungry need for knowledge on the black soldier fly digestive system*. - J. Insects as Food Feed, 8: 217-222.



- VOGEL H., MÜLLER A., HECKEL D.G., GUTZEIT H., VILCINSKAS A., 2018 - *Nutritional immunology: Diversification and diet-dependent expression of antimicrobial peptides in the black soldier fly Hermetia illucens*. - *Dev. Comp. Immunol.*, 78: 141-148.
- VON BREDOW Y.M., MÜLLER A., POPP P.F., ILIASOV D., VON BREDOW C.R., 2022 - *Characterization and mode of action analysis of black soldier fly (Hermetia illucens) larva-derived hemocytes*. - *Insect Sci.*, 29: 1071-1095.
- ZDYBICKA-BARABAS A., BULAK P., POLAKOWSKI C., BIEGANOWSKI A., WAŠKO A., CYTRYŃSKA M., 2017 - *Immune response in the larvae of the black soldier fly Hermetia illucens*. - *ISJ Invertebr. Surviv. J.*, 14: 9-17.
- ZHANG W., TETTAMANTI G., BASSAL T., HERYANTO C., ELEFThERIANOS I., MOHAMED A., 2021 - *Regulators and signalling in insect antimicrobial innate immunity: functional molecules and cellular pathways*. - *Cell. Signal.*, 83: 110003.



## THE FATE OF FOOD PATHOGENS DURING BLACK SOLDIER FLY REARING

JEROEN DE SMET <sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> *KU Leuven, Department of Microbial and Molecular Systems, Research Group for Insect Production and Processing, Kleinhoefstraat 4, 2440 Geel, Belgium;* \* Corresponding Author: [jeroen.desmet@kuleuven.be](mailto:jeroen.desmet@kuleuven.be)

Lettura tenuta durante la Tavola Rotonda “Edible insects: from biology to applications”. Seduta pubblica dell’Accademia – Firenze, 18 novembre 2022.

### *The fate of food pathogens during black soldier fly rearing*

The larvae of the black soldier fly (BSFL, *Hermetia illucens*) are among the most studied and used insects, both in academics and industry, for the conversion of a wide range of organic side/waste streams into valuable biomolecules. One major risk in this process is the microbiological load of the envisioned organic streams, which are prone to contain foodborne pathogens like *Salmonella* or *Staphylococcus aureus*. Though literature indicates that these do not impact larval health, it is still necessary to assess whether these food pathogens will enter the food chain when using these insects as feed. The given presentation summarized the latest findings of the research group on insect production and processing in this domain. First, organic residual streams were evaluated to explore which food pathogens are frequently present. Next, challenge tests were executed with *Salmonella* and *S. aureus* to map their dynamics both at the whole larvae level and in the different sections of the larval gut. These revealed a clear difference in the dynamics between both food pathogens on chicken feed. Finally, future research avenues are suggested to explore the mechanisms behind these differences.

KEY WORDS: Food pathogen, microbiological safety, *Salmonella*, *Staphylococcus aureus*, *Hermetia illucens*

### INTRODUCTION

The expanding world population presents a major challenge to our food system, which struggles to meet the associated increased production volumes in a sustainable manner. A key element in this regard are the high losses during food production (ALEXANDER *et al.*, 2017) wet mass, protein and energy. The comparison reveals significant differences between these measurements, and the potential for wet mass figures used in previous studies to be misleading. The result suggest that due to cumulative losses, the proportion of global agricultural dry biomass consumed as food is just 6% (9.0% for energy and 7.6% for protein). For this reason, our food system needs to shift from the linear usage of fossil-based products towards a more efficient (re-)usage of available renewable products. It will have to produce renewable biomass that is efficiently transformed into added value bio-products (YISHAI *et al.*, 2016), while wastes are recycled in close loops. Specific edible insect species have the potential to be key players in this transition as they offer (i) an energy-efficient, high-quality protein source for feed/food (VAN HUIS *et al.*, 2015; SALOMONE *et al.*, 2017) and/or (ii) a sustainable strategy to upcycle various waste/side streams by converting them into biomass (ČIČKOVÁ *et al.*, 2015). Numerous laboratory studies have shown that several fly species are well suited for biodegradation of organic waste, with the house fly (*Musca domestica* L.).

The Black Soldier Fly (BSF, *Hermetia illucens* L., Diptera: *Stratiomyidae*) has become one of the most important species in the world for bioconversion, being reared by multiple companies on an industrial scale at tonnes per week or month. Its larvae are able to convert a wide range of organic waste streams into biomass (ČIČKOVÁ *et al.*, 2015), composed mainly of protein (used in feed), fat and chitin (used as raw material in several industries) (CULLERE *et al.*, 2016; MAURER *et al.*, 2015; NGUYEN *et al.*, 2015). Protein meal from the BSF larvae is authorised in the EU as feed ingredient in pet food, aquaculture, pigs and poultry (IPIFF, 2021). To maximize the potential of the industrial production of edible insects to help reduce the ecological footprint of our food system the focus should always be put on its sustainability. A common tool to address this is a Life Cycle Assessment (LCA), such analyses can indicate how changes in the system can improve its sustainability (VAN ZANTEN *et al.*, 2018). An LCA study executed for BSF revealed that the use of non-utilized organic side streams and the reduction of the most energy-consuming processing steps, e.g. drying, have the biggest impact (SMETANA *et al.*, 2018).

However from a microbiological perspective, such changes do introduce a number of new risks that warrant further examination. On the one hand, many of these non-utilized organic side streams are more prone to contain a broad range of (harmful) microorganisms, hence it is important to obtain a general overview of their micro-

bial load and composition. On the other hand, a reduction in energy-consuming steps, which typically include heating, could increase the chance of specific micro-organisms surviving into the final end-product and entering the food chain. Of course, specific criteria have to be met to ensure the microbiological safety, but more detailed information on the actual dynamics of foodborne pathogens during BSF rearing would help finetune the processing steps required to ensure the microbiological safety.

#### RECENT ADVANCES IN OUR RESEARCH GROUP IP&P

To answer these questions, our research group (IP&P) set-out to explore these aspects for black soldier fly rearing and here I presented an overview of these efforts of which many have been published already in separate articles.

#### *Determining the microbiological load of several organic side streams*

The microbiological load of several non-utilized (or hardly utilized) side/waste streams was analyzed in a first stage (GORRENS *et al.*, 2021). Selected side/waste streams were chicken litter, overproduced vegetables from an auction, corn meal, grain mix, apple pulp, fruit puree, catering/supermarket/industrial food waste, household food waste, strawberry leaves, and tomato leaves. Zooming in on the food pathogen *Salmonella* only revealed its presence in small amounts in chicken litter and grain mix but only in one replicate in period 1, resulting in an average count of less than 3.2 and 2.2 log CFU/g, respectively. For all other streams, counts for *Salmonella* were below the detection limit of 2.0 log CFU/g (GORRENS *et al.*, 2021). A more concerning picture was obtained for *S. aureus*. This pathogen was observed in all replicates of all waste streams, with the exception of fruit puree. The highest values (from 7.1 to 8.7 log CFU/g) were measured for chicken litter. However catering/supermarket/industrial food waste also showed high values of 5.5 to 5.6 log CFU/g in both sampling periods. This indicates that both pathogens could enter a BSF rearing facility in theory, though the risk seems higher for *S. aureus*.

#### *Determining the in vivo dynamics of both pathogens through challenge tests*

Therefore our group explored how both pathogens behave during rearing when they are effectively present in the substrate, chicken feed, for the larvae. The detailed results of both challenge tests can be found in the following open-access publications for each of the pathogens: *Salmonella* (DE SMET *et al.*, 2021) and *S. aureus* (GORRENS *et al.*, 2021). Interestingly the dynamics of both food pathogens in the same substrate differed significantly. In the absence of BSF larvae both pathogens were able to persist in the substrate during the six day long challenge test, however *S. aureus* levels did show a small decrease compared to *Salmonella* levels. In the presence of BSF larvae the *Salmonella* levels remained high until six days after an inoculation with a high inoculation level (7 log CFU/g) in both larvae and substrate.

The level of *S. aureus* on the other hand dropped below the detection limit (2 log CFU/g) at the same time point and with the same inoculation level. These observations clearly demonstrate the caution that has to be taken into account with claiming a broad antimicrobial activity of the BSF larvae. Although previous studies did show a decrease in *Salmonella* levels during BSF rearing on manure (LALANDER *et al.*, 2015), such activity seems to vary based on the substrate and the micro-organism.

#### *Zooming in on the dynamics of a gram-positive and -negative bacterium within the BSF gut*

As documented by the group of Professor Tettamanti the gut of the BSF larvae can be subdivided in five distinct regions: foregut, anterior midgut, middle midgut, posterior midgut and hindgut (BONELLI *et al.*, 2019). Each of these regions has its own micro-environment (BONELLI *et al.*, 2019). In the final phase of the presentation I summarized the most recent findings of our group in collaboration with Dr. Daniele Bruno from the group of Prof. Tettamanti (University of Insubria). Together we explored how *Escherichia coli* (as a model for gram-negative bacteria) and *S. aureus* (as a gram-positive model) survive the passage through the different gut regions, when different inoculation levels were added to the chicken feed substrate. A more elaborate publication on the matter will be published in the upcoming year, but our preliminary findings confirm the results obtained when observing the whole larvae. Differences in the transit of the two bacteria along the gut were observed. As the middle midgut is characterized by a low pH and high lysozyme activity, this region could likely act as a protective barrier against pathogenic bacteria.

#### CONCLUSION

First of all, it is clear a number of potentially harmful micro-organisms will be present in side streams that are valuable for BSF rearing and thus action should be undertaken to monitor their presence throughout the rearing process to avoid unwanted microbial risks in the final products. At the same time, the combination of all these results demonstrate the high level of complexity that determines the dynamics of specific microbes inside the BSF larval gut and/or rearing cycle. While a case can be made that the presence of *S. aureus* seems to pose limited risks, these findings should best be confirmed on the envisioned substrate for industry. Future research should focus on exploring the mechanisms behind the remarkable difference in fate between gram-positive and gram-negative bacteria in the BSF larvae not only observed in the gut in our studies, but in the hemolymph as well (BRUNO *et al.*, 2021). Possible explanations could be the lower sensitivity of the latter to the lysozymes in the gut or the presence of specific micro-organisms that aid the larvae in their removal of specific unwanted pathogens, e.g *Trichosporon* spp. isolates that have shown to be active against *S. aureus* (GORRENS *et al.*, 2021).

#### ACKNOWLEDGEMENTS

While this presentation was given by Dr. Jeroen De Smet. It contains research from a large part of the research group for Insect Production and Processing of the KU Leuven. Hence the author would like to acknowledge Dr. Dries Vandeweyer, Ellen Gorrens, Noor Van Looveren and Laurence Van Moll from the research group, as well as Dr. Daniele Bruno and Prof. Gianluca Tettamanti from the University of Insubria for the nice collaboration.

The research was funded by the Research Foundation Flanders (FWO) via the SBO project ENTOTBIOTA (S008519N) and the ERANET FACCE SURPLUS project UpWaste (ID 28). Jeroen De Smet holds a senior post-doctoral fellowship grant from the FWO (12V5222N).

#### REFERENCES

- ALEXANDER P., BROWN C., ARNETH A., FINNIGAN J., MORAN D., ROUNSEVELL M.D.A., 2017. - *Losses, inefficiencies and waste in the global food system*. - *Agric. Syst.*, 153: 190–200.
- BONELLI M., BRUNO D., CACCIA S., SGAMBETTERRA G., CAPPELLOZZA S., JUCKER C., TETTAMANTI G., CASARTELLI M., 2019. - *Structural and Functional Characterization of Hermetia illucens Larval Midgut*. - *Front. Physiol.*, 10: 204.
- BRUNO D., MONTALI A., MASTORE M., BRIVIO M.F., MOHAMED A., TIAN L., GRIMALDI A., CASARTELLI M., TETTAMANTI G., 2021. - *Insights Into the Immune Response of the Black Soldier Fly Larvae to Bacteria*. - *Front. Immunol.*, 12.
- ČIČKOVÁ H., NEWTON G.L., LACY R.C., KOZÁNEK M., 2015. - *The use of fly larvae for organic waste treatment*. - *Waste Manag.*, 35: 68–80.
- CULLERE M., TASONIERO G., GIACCONE V., MIOTTI-SCAPIN R., CLAEYS E., DE SMET S., DALLE ZOTTE A., 2016. - *Black soldier fly as dietary protein source for broiler quails: apparent digestibility, excreta microbial load, feed choice, performance, carcass and meat traits*. - *Animal*, 1–8.
- DE SMET J., VANDEWEYER D., VAN MOLL L., LACHI D., VAN CAMPENHOUT L., 2021. - *Dynamics of Salmonella inoculated during rearing of black soldier fly larvae (Hermetia illucens) on chicken feed*. - *BioRxiv Prepr.*
- GORRENS E., VAN LOOVEREN, N., VAN MOLL L., VANDEWEYER D., LACHI D., DE SMET J., VAN CAMPENHOUT L., 2021. - *Staphylococcus aureus in Substrates for Black Soldier Fly Larvae (Hermetia illucens) and Its Dynamics during Rearing*. - *Microbiol. Spectr.*, 9.
- VAN HUIS A., DICKE M., VAN LOON J.J.A., 2015. - *Insects to feed the world*. - *J. Insects as Food Feed*, 1: 3–5.
- IPIFF, 2021. - *Insects As Feed EU Legislation – Aquaculture, Poultry & Pig Species*.
- LALANDER C.H., FIDJELAND J., DIENER S., ERIKSSON S., VINNERÅS B., 2015. - *High waste-to-biomass conversion and efficient Salmonella spp. reduction using black soldier fly for waste recycling*. - *Agron. Sustain. Dev.*, 35: 261–271.
- MAURER V., HOLINGER M., AMSLER Z., FRÜH B., WOHLFAHRT J., STAMER A., LEIBER F., 2015. *Replacement of soybean cake by Hermetia illucens meal in diets for layers*. - *J. Insects as Food Feed*, 1: 1–8.
- NGUYEN T.T.X., TOMBERLIN J.K., VANLAERHOVEN S., 2015. - *Ability of Black Soldier Fly (Diptera: Stratiomyidae) Larvae to Recycle Food Waste*. - *Environ. Entomol.*, 44: 406–410.
- SALOMONE R., SAIJA G., MONDELLO G., GIANNETTO A., FASULO S., SAVASTANO D., 2017. - *Environmental impact of food waste bioconversion by insects: Application of Life Cycle Assessment to process using Hermetia illucens*. - *J. Clean. Prod.*, 140: 890–905.
- SMETANA S., SCHMITT E., MATHYS A., 2018. - *Attributional and consequential Life Cycle Assessment of industrial feed and food intermediates production based on Hermetia illucens insect biomass*. - *J. Clean. Prod.* JCLEPRO-D-18-02816.
- YISHAI O., LINDNER S.N., GONZALEZ DE LA CRUZ J., TENENBOIM H., BAR-EVEN A., 2016. - *The formate bio-economy*. - *Curr. Opin. Chem. Biol.*, 35: 1–9.
- VAN ZANTEN H.H.E., BIKKER P., MEERBURG B.G., DE BOER I.J.M., 2018. - *Attributional versus consequential life cycle assessment and feed optimization: alternative protein sources in pig diets*. - *Int. J. Life Cycle Assess.*, 23: 1–11.



## REARING OF *TENEBRIO MOLITOR* AND ITS IMPLICATION FOR HUMAN CONSUMPTION

SARA RUSCHIONI <sup>a</sup> - NUNZIO ISIDORO <sup>a</sup> - PAOLA RIOLO <sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimentari e Ambientali, Università Politecnica delle Marche;*

Corresponding Author: s.ruschioni@univpm.it

Lettura tenuta durante la Tavola Rotonda “Edible insects: from biology to applications”. Seduta pubblica dell’Accademia – Firenze, 18 novembre 2022.

### *Rearing of Tenebrio molitor and its implication for human consumption*

There is increasing interest in alternative protein and, in a circular economy vision, insects represent one of the best sources to exploit. The European Food Safety Authority proposed a list of insect species with the greatest potential to be used as food and feed. Among these, the yellow mealworm, *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae) is one of the more popular insects considered for this use. Therefore, to make *T. molitor* more competitive with other traditional protein sources, its mass production must be optimized and to achieve this goal is essential the study of biological insect rearing on low-cost food sources. This short review briefly lists the optimal environmental conditions (temperature, moisture, RH), physical status (population density), and dietary conditions for the insect rearing. Moreover, the microbial contamination that might occur in the insect rearing influencing the insect welfare and its implication for human consumption is briefly treated.

KEY WORDS: *Tenebrio molitor*, rearing, welfare, human consumption

### INTRODUCTION

In recent years, insects have received particular attention as alternative protein sources, overcoming the most criticalities of the conventional sources (ORDONER-ARAUQUE and EGAS-MONTENEGRO, 2021).

Several studies report that edible insects have a high protein and essential amino acids content, and high digestibility (PAYNE *et al.*, 2016; GRAVEL and DOYEN, 2019; ORKUSZ, 2021). Moreover, they are good sources of essential fatty acids, microelements, vitamins, fiber, and bioactive substances (ZIELIŃSKA *et al.*, 2018).

To date, more than 2000 edible species have been described (JONGEMA, 2017), but only a few of these have been used as protein sources. The European Food Safety Authority (EFSA, 2015) proposed a list of insect species with the greatest potential to be used as food and feed, which includes the yellow mealworm (YM), *Tenebrio molitor* L. (Coleoptera: Tenebrionidae). Recently, EFSA scientific opinion declared the safety of dried YM larvae (TURCK *et al.*, 2020) and of frozen and dried formulations from whole YM larvae (TURK *et al.*, 2021) as a novel food pursuant to Regulation (EU) 2015/2283. Therefore, the YM larvae have a great potential for food production. They represent one of the most promising alternative sources of high-quality proteins, lipids, vitamins, and minerals. Moreover, compared to meat livestock, the feed conversion ratio is higher, the reproduction and growth are faster, the edibility is almost absolute (ERRICO *et al.*, 2021), and the production requires less land and emits fewer greenhouse gases and ammonia (OONINCX and DE

BOER, 2012; VAN HUIS and OONINCX, 2017). Above all, YM is relatively easy to culture and needs low water and biotic resources (LE FÉON *et al.*, 2019).

### REARING OF *TENEBRIO MOLITOR*

In Europe, the YM feed and food production as a whole larva or as a processed product (protein flours, protein extracts, and oils) has long been conducted on small scale. This rearing method is very easy and cheap. In fact, it allows the use of trays with substrate and all different stages of development together. Although simple, it is highly dependent on manual work. The mechanization of the process is possible (CORTES ORTIZ *et al.*, 2016; OONINCX and DE BOER 2012), but not competitive yet. To achieve this goal is essential the study of biological insect rearing based on low-cost food sources.

YM shows high plasticity in larval development time, survival rate, larval and pupal weight. The nutritional profile depends on the feeding media (MORALES-RAMOS *et al.*, 2010; OONIX *et al.*, 2015; VAN BROEKHOVEN *et al.*, 2015; DREASSI *et al.*, 2017; FRANCARDI *et al.*, 2017; KIM *et al.*, 2017; MORALES-RAMOS *et al.*, 2019). However, to have a sustainable final product in the shortest time, the right rearing parameters must be first considered. Therefore, the optimal range of environmental conditions, physical status, and dietary rearing conditions must be identified.

The most important environmental parameter is the temperature, on which YM resilience largely depend, even if the interaction of temperature and moisture considera-

bly affect the larval development and survival. Different stages of YM development required approximately the same temperature (RIBEIRO *et al.*, 2018) which is 25–28°C (PUNZO and MUTCHMOR, 1980; SPENCER and SPENCER, 2006; KOO *et al.*, 2013; KIM *et al.*, 2015), temperature below 17°C inhibits embryonic development (KOO *et al.*, 2013) and temperature at 30°C increases death rates (LUDWIG, 1956; KOO *et al.*, 2013). Considering the moisture, with the increase in humidity percentage, the growth rate increases, although this condition could favor the colony contamination by microorganisms and mites (FRAENKEL, 1950). Instead, a reduction in humidity percentage could cause temporarily larval starvation (URS and HOPKINS, 1973). Even if less influencing the growth, different values of RH cause variability of YM response. The optimum range of RH is 60% to 75% (PUNZO, 1975; PUNZO and MUTCHMOR, 1980; MANOJLOVIC, 1987). A very important aspect to consider is the combination of temperature and RH, cause effects considerably the water absorption capacity in different stages.

Also, particular attention must be given to the population density. Higher population densities result in fewer larval instars and smaller mature larvae size (CONNAT *et al.*, 1991; MORALES-RAMOS *et al.*, 2012; MORALES-RAMOS and ROJAS, 2015). Moreover, higher densities inhibit the population, promote the cannibalism (TSCHINKEL and WILLSON, 1971), and reduce the growth rates (WEAVER and MCFARLANE, 1990). Another important consequence of the overcrowded populations is the increase in temperature due to the larval metabolism which can be lethal.

Last, but not least, YM is a highly polyphagous insect that do not highlight specific dietary rearing conditions. Different substrates have been studied in the last decade (RUSCHIONI *et al.*, 2020), showing that YM feeds primarily on farinaceous materials such as flour and meal (RIBEIRO *et al.*, 2018), but it can easily grow on low-nutrient vegetables or agri-food industry by-products, crop residues even rich in lignocellulose and other substrates (RUSCHIONI *et al.*, 2020; ERRICO *et al.*, 2021). The strong point of YM rearing is that it can consume a lot of by-products, bio-converting them for feed and food production in a circular economy view (RUSCHIONI *et al.*, 2020). A feature of this insect is the ability to select foods to balance its diet and its ratio intake according to its nutritional needs. Despite this, it has been shown that the growth rate and the production of the colony improve when in the substrate are present: 80-85% of carbohydrates, less than 1% of fats, proteins as yeast and casein and B-complex vitamins. Thus, to have a good larval performance, a supplement of these ingredients is required. YM reared on dry substrates and fed with nutrient resources containing water showed higher growth rates, increasing survival rates, and reduced development time (OONINCX, 2015; URS and HOPKINS, 1973).

#### INSECT WELFARE AND IMPLICATION FOR HUMAN CONSUMPTION

As mentioned above, edible insects attracted the attention of the European Union. Among them, YM represents one of the most popular species used for the large-

scale conversion of several by-products into protein. Therefore, according to EFSA, a proper risk assessment should be carried out to evaluate the potential rearing risks (EFSA, 2015). In fact, the contamination that might occur in the insect rearing, may influence the insect welfare and its implication for human consumption. Generally, among the safety hazards borne by edible insects, microorganisms are the most noteworthy. YM can be infected by microorganisms occurring in the feed or in the rearing environment that can naturally contaminate the external cuticle of insects as well as their intestines through ingestion of contaminated feed (OSIMANI *et al.*, 2017; OSIMANI *et al.*, 2018a, 2018b; GAROFALO *et al.*, 2019). Moreover, microbial contamination could be a result of vertical transmission from the mother to the offspring (OSIMANI *et al.*, 2021). CESARO *et al.* (2022 a,b). As showed previously optimal rearing environment conditions are not favorable for microbial survival and multiplication. Moreover, the larvae fed with contaminated substrates seemed to be environments for microbial survival or multiplication. These data suggested the low possibility of negative implications for human consumption. The low persistence of the microorganism in the farm reduces the possibility of YM to be infected. This result is very important, since the microorganism infection may influence the insect resistance to abiotic and biotic stress and, consequently, the quality of the production. The presence of microorganisms can lead to an alteration of the intestinal microbiome that plays important roles in YM health and welfare (mobilizing stored nitrogen, providing essential nutrients and amino acids for the host, increasing its immune system), thus affecting the development of the intestinal epithelium, the growth of the organism and the survival (COON *et al.*, 2014; RUOKOLAINEN *et al.*, 2016the gut microbiota plays a role in digestion and metabolism of the host as well as protects the host against pathogens. In the study reported here, we sampled gut microbiota of the larvae of the Glanville fritillary butterfly (*Melitaea cinxia*; ENGEL and MORAN, 2013). The intestinal microbiome alteration, may lead to a reduction in growth, consequently compromising the production. The investigation of different hazardous microorganism effects on the growth and the survival of YM is essential to reach a high level of quality in rearing. Recent studies showed that YM performance and the mid intestinal conditions are not influenced by target microorganisms (LEPRE *et al.*, in progress). Further research is needed to better understand the relationship between microbe contamination and YM rearing.

#### REFERENCES

- CESARO C., MANNOZZI C., LEPRE A., FERROCINO I., BELLEGGIA L., CORSI L., OSIMANI, A., 2022 – *Staphylococcus aureus artificially inoculated in mealworm larvae rearing chain for human consumption: Long-term investigation into survival and toxin production* - Food Research International, 162: 112083.
- CESARO C., MANNOZZI C., LEPRE A., FERROCINO I., CORSI



- L., FRANCIOSA I., OSIMANI A., 2022 – *Fate of Escherichia coli artificially inoculated in Tenebrio molitor L. larvae rearing chain for human consumption*. - Food Research International, 157: 111269.
- CONNAT J.L., DELBECQUE J.P., GLITHO I., DELACHAMBRE J., 1991 – *The onset of metamorphosis in Tenebrio molitor larvae (Insecta, Coleoptera) under grouped, isolated and starved conditions* - J. Insect Physiol., 37(9): 653–657, 659–662.
- COON K.L., VOGEL K.J., BROWN M.R., STRAND M.R., 2014 – *Mosquitoes rely on their gut microbiota for development*, - Molecular Ecology, 23(11): 2727–2739.
- CORTES ORTIZ J.A., RUIZ A.T., MORALES-RAMOS J.A., THOMAS M., ROJAS M.G., TOMBERLIN J.K., YI L., HAN R., GIROUD L., JULLIEN R.L., 2016 – *Insect mass production technologies*, pp. 153–201. In: DOSSEY A.T., J. MORALES-RAMOS, and M.G. ROJAS (eds.), *Insects as Sustainable Food Ingredients*; Elsevier Academic Press, Amsterdam, the Netherlands.
- ENGEL P., MORAN N. A., 2013 – *The gut microbiota of insects - diversity in structure and function*. - FEMS Microbiology Reviews, 37(5): 699–735.
- ERRICO S., SPAGNOLETTA A., VERARDI A., MOLITERNI S., DIMATTEO S., SANGIORGIO P., 2022 – *Tenebrio molitor as a source of interesting natural compounds, their recovery processes, biological effects, and safety aspects*. - Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 21(1): 148–197.
- FRAENKEL, G., 1950 – *The nutrition of the mealworm, Tenebrio molitor L. (Tenebrionidae, Coleoptera)*. - Physiol. Zool., 23: 92–108.
- GAROFALO C., MILANOVIC V., CARDINALI F., AQUILANTI L., CLEMENTI F., OSIMANI A., 2019 – *Current knowledge on the microbiota of edible insects intended for human consumption: A state-of-the-art review*. - Food Research International, 125, Article 108527.
- GRAVEL A., DOYEN A., 2019 – *The use of edible insect proteins in food: Challenges and issues related to their functional properties*. - Innovative Food Science & Emerging Technologies, 59: 102272.
- Jongema Y., 2017 – *List of edible insect species of the world* - Laboratory of Entomology, Wageningen University.
- KIM S.Y., BIN PARK J., LEE Y.B., YOON H.J., LEE K.Y., KIM N.J., 2015 – *Growth characteristics of mealworm Tenebrio molitor*. - J. Sericultural Entomol. Sci., 53: 1–5.
- KOO H., KIM S., OH H., KIM J., CHOI D., KIM D., KIM I., 2013 – *Temperature-dependent development model of larvae of mealworm beetle, Tenebrio molitor L. (Coleoptera: Tenebrionidae)*. - Korean J. Appl. Entomol., 52: 387–394.
- LE FÉON S., THÉVENOT A., MAILLARD F., MACOMBE C., FORTEAU L., AUBIN J., 2019 – *Life Cycle Assessment of fish fed with insect meal: Case study of mealworm inclusion in trout feed, in France* - Aqua-culture, 500: 82–91.
- LUDWIG D., 1956 – *Effects of temperature and parental age on the life cycle of the mealworm, Tenebrio molitor Linnaeus (Coleoptera, Tenebrionidae)*. - Ann. Entomol. Soc. Am., 49: 12– 15.
- MANOJLOVIC B., 1987 – *A contribution of the study of the influence of the feeding of imagos and of climatic factors on the dynamics of oviposition and on the embryonal development of yellow mealworm Tenebrio molitor L. (Coleoptera: Tenebrionidae)*. - Zaštita bilja, 38: 337– 348.
- MORALES-RAMOS J.A., ROJAS M.G., 2015 – *Effect of larval density on food utilization efficiency of Tenebrio molitor (Coleoptera: Tenebrionidae)*. - J. Econ. Entomol., 108: 2259– 2267.
- MORALES-RAMOS J.A., ROJAS M.G., KAY S., SHAPIRO-ILAN D.I., TEDDERS W.L., 2012 – *Impact of adult weight, density, and age on reproduction of Tenebrio molitor (Coleoptera: Tenebrionidae)*. - J. Entomol. Sci., 47: 208–220.
- OONINCX D.G.A.B., de BOER I.J.M., 2012– *Environmental impact of the production of mealworms as a protein source for humans – A life cycle assessment*. - Plos One, 7(12): e51145.
- ORDOÑEZ-ARAQUE R., EGAS-MONTENEGRO E., 2021 – *Edible insects: A food alternative for the sustainable development of the planet*. - International Journal of Gastronomy and Food Science, 23: 100304.
- ORKUSZ A., 2021 – *Edible insects versus meat—Nutritional comparison: Knowledge of their composition is the key to good health*. - Nutrients, 13: 1207.
- OSIMANI A., FERROCINO I., CORVAGLIA M. R., RONCOLINI A., MILANOVIC V., GAROFALO C., CLEMENTI F., 2021 – *Microbial dynamics in rearing trials of Hermetia illucens larvae fed coffee silverskin and microalgae* - Food Research International, 140, Article 110028.
- OSIMANI A., GAROFALO C., AQUILANTI L., MILANOVIC V., CARDINALI F., TACCARI M., CLEMENTI F., 2017 – *Transferable antibiotic resistances in marketed edible grasshoppers (Locusta migratoria migratorioides)* - Journal of Food Science, 82: 1184–1192.
- OSIMANI A., MILANOVIC V., CARDINALI F., GAROFALO C., CLEMENTI F., PASQUINI M., AQUILANTI L., 2018 – *The bacterial biota of laboratory-reared edible mealworms (Tenebrio molitor L.): From feed to frass* - International Journal of Food Microbiology, 272: 49–60.
- OSIMANI A., MILANOVIC V., GAROFALO C., CARDINALI F., RONCOLINI A., SABBATINI R., AQUILANTI L., 2018 – *Revealing the microbiota of marketed edible insects through PCR-DGGE, metagenomic sequencing and real-time PCR* - International Journal of Food Microbiology, 276: 54–62.
- PAYNE C. L., SCARBOROUGH P., RAYNER M., NONAKA K., 2016 – *Are edible insects more or less ‘healthy’ than commonly consumed meats? A comparison using two nutrient profiling models developed to combat over- and undernutrition* - European Journal of Clinical Nutrition, 70(3): 285–291.
- PUNZO F., MUTCHMOR J.A., 1980 – *Effects of temperature, relative humidity and period of exposure on the survival capacity of Tenebrio molitor (Coleoptera: Ten-*

- ebrionidae) - J. Kansas Entomol. Soc. 53: 260–270.
- PUNZO F., 1975 – *Effects of temperature, moisture, and thermal acclimation on the biology of Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae) - Ph.D. Dissertation, Iowa State University, Ames.
- RIBEIRO N., ABELHO M., COSTA R., 2018 – *A review of the scientific literature for optimal conditions for mass rearing Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae) - Journal of Entomological Science, 53(4): 434-454.
- RUOKOLAINEN L., IKONEN S., MAKKONEN H., HANSKI I., 2016 – *Larval growth rate is associated with the composition of the gut microbiota in the Glanville fritillary butterfly* - Oecologia, 181(3): 895–903.
- RUSCHIONI S., LORETO N., FOLIGNI R., MANNOZZI C., RAFFAELLI N., ZAMPORLINI F., MOZZON M., 2020 – *Addition of olive pomace to feeding substrate affects growth performance and nutritional value of mealworm (Tenebrio molitor L.) larvae* - Foods, 9(3): 317.
- SPENCER W., SPENCER J., 2006 – *Management guideline manual for invertebrate live food species* - EAZA Terr. Invertebr., TAG. 1–54.
- TSCHINKE W.R., WILLSON C.D., 1971 – *Inhibition of pupation due to crowding in some tenebrionid beetles* - J. Exp. Zool. 176: 137–145.
- TURCK D., BOHN T., CASTENMILLER J., DE HENAUW S., HIRSCH-ERNST K. I., KNUTSEN H. K., 2022 – *Safety of frozen and freeze-dried formulations of the lesser mealworm (Alphitobius diaperinus larva) as a Novel food pursuant to Regulation (EU) 2015/2283* - EFSA Journal, 20(7).
- TURCK D., CASTENMILLER J., DE HENAUW S., HIRSCH-ERNST K. I., KEARNEY J., MACIUK A., KNUTSEN H. K., 2021 – *Safety of dried yellow mealworm (Tenebrio molitor larva) as a novel food pursuant to Regulation (EU) 2015/2283* - EFSA Journal, 19.
- URS K.C.D., HOPKINS T.L., 1973 – *Effect of moisture on growth rate and development of two strains of Tenebrio molitor L.* (Coleoptera, Tenebrionidae) - J. Stored Prod. Res. 8: 291–297.
- VAN HUIS A., OONINCX D.G.A.B., 2017 – *The environmental sustainability of insects as food and feed* - A review, Agronomy for Sustainable Development, 37, 43.
- WEAVER D.K., McFARLANE J.E., 1990 – *The effect of larval density on growth and development of Tenebrio molitor* - J. Insect Physiol. 36: 531–536.
- ZIELIŃSKA E., KARAS' M., JAKUBCZYK A., ZIELIŃSKI D., BARANIAK B., 2018 – *Edible insects as source of proteins* - Reference series in phytochemistry (pp. 1–53).

## WASTE RECYLING WITH FLY LARVAE: FROM SCIENCE TO PRACTICE

MORITZ GOLD <sup>a</sup> - ALEXANDER MATHYS <sup>a</sup>

<sup>a</sup> *ETH Zurich, Sustainable Food Processing, Institute of Food, Nutrition and Health, Schmelzbergstrasse 9, 8092 Zurich, Switzerland. E-mail: moritz.gold@hest.ethz.ch*

Lettura tenuta durante la Tavola Rotonda “Edible insects: from biology to applications”. Seduta pubblica dell’Accademia – Firenze, 18 novembre 2022.

### *Waste recycling with fly larvae: from science to practice*

The black soldier fly (BSF), *Hermetia illucens*, is of the dipteran family Stratiomyidae. It can be encountered in nature worldwide in the tropical and sub-tropical areas. Black soldier fly larvae (BSFL) treatment is an emerging technology for the conversion of biowaste using the natural capacity of the immature life stage of BSF to grow on a wide variety of organic materials. Unknown or variable performance for different biowastes is currently one challenge that prohibits the global up-scaling of this technology with potential positive environmental and societal impacts. This article presents three applied research projects working towards reliable and efficient biowaste treatment with BSFL on heterogenous feedstocks to produce feed and fertilizer products. (1) Estimating feedstock nutrient value from *in vitro* digestions, (2) balancing feedstock nutrient composition with feedstock formulation and (3) smart process control to respond to variable feedstock compositions. There is an enormous research gap on many aspects regarding this insect that different disciplines of entomology can address (e.g. physiology, nutrient absorption, growth signaling, genetics, reproduction, behavior).

KEY WORDS: black soldier fly, diptera, *hermetia illucens*, circular economy

#### BLACK SOLDIER FLY BIOWASTE TREATMENT

The black soldier fly (BSF), *Hermetia illucens*, is of the dipteran family Stratiomyidae. It can be encountered in nature worldwide in the tropical and sub-tropical areas between the latitudes of 40°S and 45°N (DORTMANS *et al.*, 2017). Black soldier fly larvae (BSFL) treatment is an emerging technology for the conversion of biowaste using the natural capacity of the immature life stage of BSF to grow on a wide variety of organic materials. BSFL treatment converts biowastes and agri-food byproducts into marketable high-value products according to circular economy principles (BORTOLINI *et al.*, 2020; CAPPELLOZZA *et al.*, 2019; VILCINSKAS, 2013; WANG & SHELOMI, 2017).

In addition to the recycling of nutrients into raw materials for fertilizer, lubricants and biodiesel, pharmaceuticals, and animal feeds markets, BSFL treatment can have reduce environmental impact. For example, depending on their operational conditions, BSFL conversion can reduce emissions from biowaste treatment in comparison to composting (ERMOLAEV *et al.*, 2019; MERTENAT *et al.*, 2019; PANG *et al.*, 2020), and animal feed products can have a lower environmental impact than conventional feeds when produced with BSFL (SMETANA *et al.*, 2016; 2019).

There is an enormous research gap on many aspects regarding this insect that different disciplines of entomology can address.

#### FROM SCIENCE TO PRACTICE

BSFL have a high plasticity to different feedstock nutrient compositions. This is a strength because they can grow on almost any non-lignocellulosic biowaste and side streams (e.g. manures, slaughterhouse wastes, food waste, agri-food byproducts, sludges). However, BSFL have a variable rearing performance on these feedstocks based on nutrient composition, rearing parameters, microbial communities, genetics and unknown factors. Unknown or variable performance for different biowastes is currently one challenge that prohibits the global up-scaling of this technology with potential positive environmental and societal impacts. This article presents three applied research projects working towards reliable and efficient biowaste treatment with BSFL on heterogenous feedstock to produce feed and fertilizer products.

#### ESTIMATING FEEDSTOCK NUTRIENT VALUE FROM IN VITRO DIGESTIONS

One can only influence/control what one can measure. Therefore, this study describes simulated midgut digestion for BSFL to estimate biowaste conversion performance (GOLD *et al.*, 2020). Before simulation, the unknown biowaste residence time in the three midgut regions was determined on three diets varying in protein and non-fiber carbohydrate content. For the static *in vitro* model, diet residence times of 15 min, 45 min, and 90 min

Table 1 - Median of probability density function of the BSFL midgut residence time distributions (min) with three artificial diets varying in protein and NFC content (GOLD *et al.*, 2020).

Diets	n*	AMG	MMG	PMG 1	PMG 2	Total
P <sup>13</sup> NFC <sup>8</sup>	233	14	37	62	36	154
P <sup>13</sup> NFC <sup>47</sup>	218	17	46	77	44	191
P <sup>7</sup> NFC <sup>47</sup>	176	41	32	65	37	195

\* n = total number of larvae dissected per diet. AMG: Anterior midgut; MMG: Middle midgut; PMG: Posterior midgut; n: number of larvae

were used for the anterior, middle, and posterior midgut region, respectively (see Table 1). The model was validated by comparing the ranking of diets based on *in vitro* digestion products to the ranking found in *in vivo* feeding experiments. Four artificial diets and five biowastes were digested using the model, and diet digestibility and supernatant nutrient contents were determined. This approach was able to distinguish broadly the worst and best performing rearing diets. However, for some of the diets, the performance estimated based on *in vitro* results did not match with the results of the feeding experiments. Future studies should try to establish a stronger correlation by considering fly larvae nutrient requirements, hemicellulose digestion, and the diet/gut microbiota. *In vitro* digestion models could be a powerful tool for academia and industry to increase conversion performance of biowastes with BSFL.

BALANCING FEEDSTOCK NUTRIENT COMPOSITION WITH FEEDSTOCK FORMULATION

This research assessed the co-conversion of several feedstock to compensate for variability in the composition of biowastes (GOLD *et al.*, 2020). Using detailed nutrient analyses, this research assessed whether mixing biowastes to similar protein and non-fibre carbo-

hydrate (NFC) contents increased the performance and reduced the variability of BSFL treatment in comparison to the treatment of individual wastes. The biowastes examined were mill by-products, human faeces, poultry slaughterhouse waste, cow manure, and canteen waste. Biowaste formulations had a protein-to-NFC ratio of 1:1, a protein content of 14–19%, and a NFC content of 13–15% (dry mass). Performance parameters that were assessed included survival and bioconversion rate, waste reduction, and waste conversion and protein conversion efficiency.

In comparison to poultry feed (benchmark), vegetable canteen waste showed the best performance and cow manure performed worst. Formulations showed significantly improved performance and lower variability in comparison to the individual wastes (see Fig. 1). However, variability in performance was higher than expected for the formulations. One reason for this variability could be different fibre and lipid contents, which correlated with the performance results of the formulations. Overall, this research provides baseline knowledge and guidance on how BSFL treatment facilities may systematically operate using biowastes of varying types and compositions. This knowledge was applied with a company at a BSFL treatment facility in Nairobi, Kenya (GOLD *et al.*, 2021).

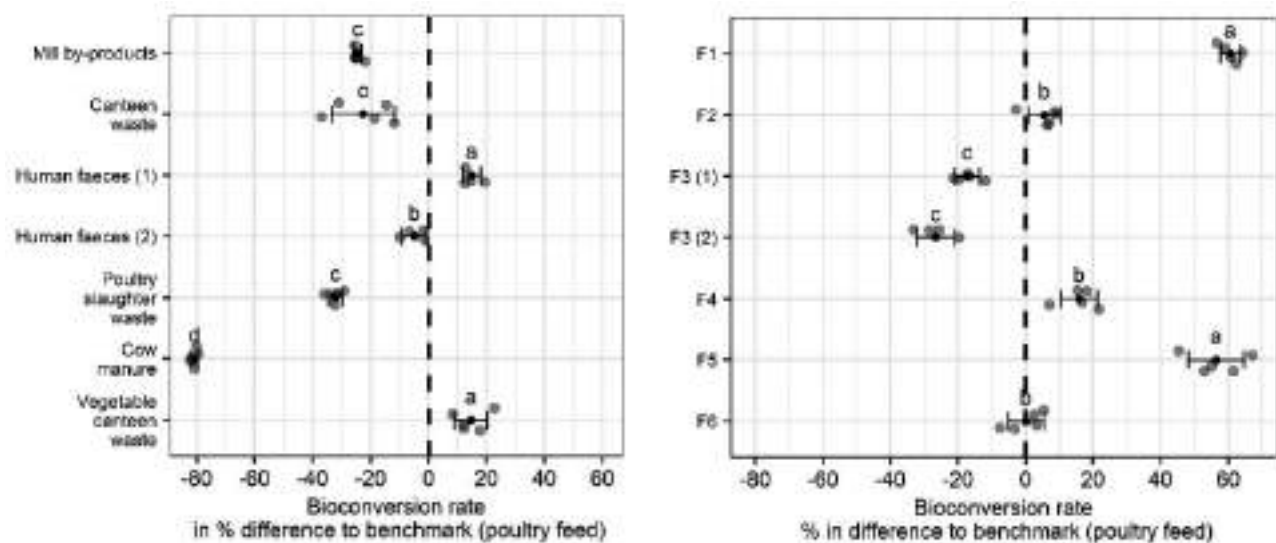


Fig. 1 - Effects of the different waste formulations on bioconversion rate (right) in comparison to the raw feedstocks. Means, standard deviations and results per replicate are displayed (GOLD *et al.*, 2020). Performance results with no shared letter are significantly different from each other. All results are given in dry mass.

SMART PROCESS CONTROL TO RESPOND  
TO VARIABLE FEEDSTOCK COMPOSITIONS

Next to measuring the feedstock nutrient value (*i.e. in vitro* formulations), balancing feedstock nutrients (*i.e.* with formulation based on nutrient composition analyses and larval nutrient requirements) smart process control that responds to the variable rearing performance is a promising approach. Such process control would be especially relevant for smaller sized BSFL treatment facilities, *e.g.* in dense urban environments (*e.g.* Singapore) where central large-footprint BSFL treatments are not feasible. Process control could be built around real-time measurements of parameters that predict rearing performance. This would be similar to the utilization of other insects, such as bees, where sensors are used to assess colony health. Examples include food waste spectroscopic profiles (*e.g.* near infrared spectroscopy) and real time analysis of growing crate temperature heat maps, larval movement (*e.g.* using bioacoustics) and even emissions/odors (*e.g.* H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, NH<sub>4</sub>, CH<sub>4</sub>). Once relationships are established, these parameters can be measured to vary rearing parameters (*e.g.* ventilation rate, moisture content and pH) with variable biowaste feedstocks.

KEY TAKEAWAYS

Research on edible insects including the BSF is highly relevant for industry. Further, practice can deliver relevant research questions that once answered can contribute to positive environmental and societal impacts. There is an enormous research gap on many aspects regarding this insect that different disciplines of entomology can address (*e.g.* physiology, nutrient absorption, growth signaling, genetics, reproduction, behavior). Even though there is competition among insect industry players, companies are frequently interested to pool knowledge if they address the entire industry and are too comprehensive for one company to address (*e.g.* inbreeding, safety, diseases, physiology). As companies mature and establish competent research departments, they can be quality research papers. This collaboration however also must consider the publication culture of research that aims to provide critical and public knowledge.

REFERENCES

- BORTOLINI S., MACAVEI L.I., SAADOUN J.H., FOCA G., ULRICI A., BERNINI F., MALFERRARI D., SETTI L., RONGA D., MAISTRELLO L., 2020 - *Hermetia illucens (L.) larvae as chicken manure management tool for circular economy*. - Journal of Cleaner Production, 262: 121289.Fherm
- CAPPELLOZZA S., LEONARDI M.G., SAVOLDELLI S., CARMINATI D., RIZZOLO A., CORTELLINO G., TEROVA G., MORETTO E., BADAILE A., CONCHERI G., SAVIANE A., BRUNO D., BONELLI M., CACCIA S., CASARTELLI M., TETTAMANTI G., 2019. - *A first attempt to produce proteins from insects by means of a circular economy*. - Animals, 9(5): 1–24.
- DORTMANS B., DIENER S., VERSTAPPEN B.M., ZURBRÜGG C., 2017 - *Black soldier fly biowaste processing: A Step-by-Step Guide*. - Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag), Zurich, Switzerland.
- ERMOLAEV E., LALANDER C., VINNERÅS B., 2019. - *Greenhouse gas emissions from small-scale fly larvae composting with Hermetia illucens*. - Waste Management, 96: 65–74.
- GOLD M., CASSAR C.M., ZURBRÜGG C., KREUZER M., BOULOS S., DIENER S., MATHYS A., 2020. - *Biowaste treatment with black soldier fly larvae: Increasing performance through the formulation of biowastes based on protein and carbohydrates*. - Waste Management, 102: 319–329.
- GOLD M., EGGER J., SCHEIDEGGER A., ZURBRÜGG C., BRUNO D., BONELLI M., TETTAMANTI G., CASARTELLI M., SCHMITT E., KERKAERT B., SMET J. DE CAMPENHOUT L. VAN, MATHYS A., 2020. - *Estimating black soldier fly larvae biowaste conversion performance by simulation of midgut digestion*. - Waste Management, 112: 40–51.
- GOLD M., IRERI D., ZURBRÜGG C., FOWLES T., MATHYS A., 2021. - *Efficient and safe substrates for black soldier fly biowaste treatment along circular economy principles*. - Detritus, 16: 31–40.
- MERTENAT A., DIENER S., ZURBRÜGG C., 2019. - *Black Soldier Fly biowaste treatment – Assessment of global warming potential*. - Waste Management, 84: 173–181.
- PANG W., HOU D., CHEN J., NOWAR E.E., LI Z., HU R., TOMBERLIN J.K., YU Z., LI Q., WANG S., 2020. - *Reducing greenhouse gas emissions and enhancing carbon and nitrogen conversion in food wastes by the black soldier fly*. - Journal of Environmental Management, 260.
- SETTI L., 2019 - *Use of black soldier fly (Hermetia illucens (L.), Diptera: Stratiomyidae) larvae processing residue in peat-based growing media*, 95. - Waste Management, 278.
- SMETANA S., PALANISAMY M., MATHYS A., HEINZ V., 2016. - *Sustainability of insect use for feed and food: Life Cycle Assessment perspective*. - Journal of Cleaner Production, 137: 741–751.
- SMETANA S., SCHMITT E., MATHYS A., 2019. - *Sustainable use of Hermetia illucens insect biomass for feed and food: Attributional and consequential life cycle assessment*. - Resources, Conservation and Recycling, 144, 285–296.
- VILCINSKAS A., 2013. - *Yellow Biotechnology I: Insect Biotechnologie in Drug Discovery and Preclinical Research*. Springer.
- WANG, Y.-S., SHELOMI M., 2017. - *Review of Black Soldier Fly (Hermetia illucens) as Animal Feed and Human Food*. - Foods, 6(10): 91.



## INSECTS AS TOOLS FOR MAKING CIRCULAR ECONOMY IN APPLIED RESEARCH PROJECTS

LARA MAISTRELLO <sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Dipartimento di Scienze della Vita, Centro Interdipartimentale BIOGEST-SITEIA, Università di Modena e Reggio Emilia, Via G. Amendola 2, 42122 Reggio-Emilia.*

Corresponding Author: [lara.maistrello@unimore.it](mailto:lara.maistrello@unimore.it)

Lettura tenuta durante la Tavola Rotonda “Edible insects: from biology to applications”. Seduta pubblica dell’Accademia – Firenze, 18 novembre 2022.

### *Insects as tools for making circular economy in applied research projects*

The world is currently experiencing a great contradiction between the need to feed a constantly growing human population, satisfying the need for proteins without negatively affecting the environment to obtain them, and on the other hand a shameful food waste along the different levels of the value chain. In this context, insects can play a fundamental role as bioconverters to upcycle the bio-waste into high value-added products (proteins, fats, chitin and frass fertilizer) useful for various industrial and agricultural sectors, starting from the food and feed industry.

In particular, the black soldier fly (BSF) *Hermetia illucens* is the most widely used mini-livestock due to its extraordinarily efficient bioconversion capacity, making it a perfect tool to implement circular economy. BSF has been chosen for the valorization of various types of organic side streams in applied research projects carried out between 2016 and 2023 in Emilia Romagna region, where the agri-food production is a key sector of the region’s economy. Project outcomes include: optimization of BSF larval rearing in various agri-food by-products; protocols for the fractionation of BSF biomass; pilot plants for the rearing, processing and stabilization of BSF; a patent for an egg-laying device; agronomic assessments of the frass; development of bird and fish feed formulations; LCA of the different rearing processes of the BSF; development of bioplastics from BSF proteins; GIS-based multi-criteria site suitability assessment for insect farms. Despite the great interest, insect farming is not yet a reality in Italy. Potential reasons for this situation are discussed.

KEY WORDS: Insects as bioconverters, black soldier fly, insect farming, bio-waste valorization

### CONTRADICTORY ISSUES: GROWING POPULATION, PROTEIN HUNGER AND FOOD WASTE

On November 15, 2022, the human population in the world reached 8 billion units and is projected to reach 9.7 billion by 2050 (GU *et al.*, 2021). One of the major challenges is to feed the increasing global population with nutritious food with the aim of reducing as much as possible the environmental impact of food production. According to FAO estimates, the world demand for animal-derived protein is expected to rise by 70–80% (FAO, 2017) by 2050. However, the animal-based food supply chain is the one with the greatest environmental impact in terms of GHG (green house gas) emissions, land and water use, acidification and eutrophication potential (POORE & NEMECEK, 2018). Furthermore, the current farming systems, both for animal and plant based foods, are the least resilient to all types of hazards, including biotic, abiotic and international risk factors (TZACHOR *et al.*, 2021).

On the other side, about one third to one fourth of all food produced for human consumption is lost or wasted globally each year, with a consequent major squandering of water, land, energy, labour and capital (FAO, 2019). In

European countries, the total bio-waste (i.e. biodegradable waste, which does not include forestry or agricultural residues, manure, sewage sludge, and waste from the textile and paper industries) in municipal waste is on average 168 kg/person, accounting for 34% of the total waste production (EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY *et al.*, 2020). Food is lost or wasted throughout the entire supply chain, but mostly in households (53%), followed by processing (19%), food service (12%), food production (11%) and wholesale and retails (5%) (STENMARCK *et al.*, 2016). According to the EU food waste hierarchy, waste prevention has the highest priority, followed by re-use (redistribution to people and use as animal feed), recycling by anaerobic digestion and composting, and by incineration with energy recovery while disposal without energy recovery and in landfills are the least desirable options (EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY *et al.*, 2020).

### INSECT FARMING AS A SUSTAINABLE SOLUTION FOR THE CONTRADICTORY ISSUES

In this context, the challenge is to find sustainable alternatives that upcycle food side streams while providing

valuable resources to be used for feed and food production. This is where insects come into play. Growing food waste represents a serious environmental, political and social issue and the use of insects as bioconverters of food side streams is a valuable solution to reduce this issue while offering high quality nutrients that can be exploited not only for feed and food production (FAO, 2021) but also for many other industrial and agricultural purposes.

Of the 1,024,000 described insect species (STORK, 2018), 2111 are currently eaten by humans and pets or farm animals (FAO, 2021). Edible insect species are a nutritious alternative due to the macro- and micronutrients they possess. In general, they have a protein content that varies from 40 to 65% (dry matter) depending on the species, they are rich in essential amino acids, mono- and polyunsaturated fatty acids, vitamins, minerals and fiber (chitin) (ORDOÑEZ-ARAQUE *et al.*, 2022). Most of the edible species are harvested from the wild and eaten in tropical-subtropical regions, and there are now only a few species with optimal characteristics for mass rearing in industrial conditions (VAN HUIS, 2020). Currently, the black soldier fly (BSF) *Hermetia illucens* (Diptera, Stratiomyidae) (Fig. 1) is the most widely used edible insect as mini-livestock globally (VAN HUIS 2020), as the larvae can thrive on a variety of wet organic side streams, including manure and catering waste.



Fig. 1 - The black soldier fly *Hermetia illucens*: mature larvae, adult and eggmasses (Foto Giulia Pinotti)

The bioconversion process carried out by BSF larvae is summarized in Fig. 2. Low-value heterogeneous bio-waste is converted into highly homogenous products with high added value: mature larvae and frass. Larval biomass is rich in proteins, lipids, chitin and antimicrobial bioactive compounds, substances which are used in the feed/food industry and in many other industrial contexts (biomedical uses, cosmetics, biodiesel, bioplastics, biodegradable/edible packaging, emulsifying and foaming agents, lubricants) (MÜLLER *et al.*, 2017, RAVI *et al.*, 2020, SURENDRA *et al.*, 2020). Larval frass, rich in nutrients and chitin, is an excellent fertilizer for agricultural purposes (KACZOR *et al.*, 2022, LOPES *et al.*, 2022).

The average larval development time is typically 15-20 days and the average reduction of the initial substrate is 60-80%, but these parameters vary greatly according

to the rearing substrate; besides, due to the larval activity there is a significant decline in the bacterial load and bad smells (BESKIN *et al.* 2018, GOLD *et al.* 2018).

#### APPLIED RESEARCH PROJECTS FOCUSED ON BLACK SOLDIER FLY IN EMILIA ROMAGNA

Due to the extraordinarily efficient bioconversion ability, BSF makes a perfect tool to implement circular economy. For this reason, BSF has been chosen for the valorization of various types of organic side streams in applied research projects (Fig. 3) carried out in Italy between 2016 and 2023 in Emilia Romagna region, where the agri-food production is a key sector of the region's economy. In Emilia Romagna there are many agri-food companies, especially in the food processing chain, with consequent high amounts and large availability of agro-industrial production waste and by-products. A small fraction of these side streams is used for animal feed, composting and energy production. However, most of this bio-waste is either incinerated or sent to landfill and alternatives that allow its upcycling are strongly needed. The projects, whose main features are summarized in Fig. 3, are the following: ValoriBio, Flies4Value, Bioeco-Flies, Flies4Feed and Scalibur. ValoriBio and Flies4Value were regional "research & innovation" pro-



Fig. 2 - Schematization of the bioconversion process carried out by *Hermetia illucens* larvae.

jects whose financed partners were applied research centres located Emilia Romagna. Each project also had to include companies, which had to have an active role in the project (such as donors of materials, potential end users) with staff involvement, but were not financed. Scalibur was an "innovation action" in the Horizon 2020 Research and Innovation Programme, whose partners included research centres, companies and municipalities from several EU countries. The general objectives of this type of projects is to provide innovative research based solutions and technologies (i.e. pilot plants, patents), exploitable by companies and the community, useful for the development of new value chains.

Bioeco-Flies and Flies4Feed are rural development projects whose partners are research centres and farms and the objective is to provide farmers with "ready-to-use" research based solutions, i.e. the diversification of



agricultural activities, an alternative source of income.

All projects had specific dissemination plans dedicated to stakeholders and the scientific community, namely: research articles, informative articles for non-experts, press-releases, meetings for stakeholders, field and laboratory visits, training courses for farmers (only for rural development projects). All projects were carried out by teams with highly multidisciplinary skills. All the projects had entomology, food chemistry, LCA, and engineering (for the creation of prototypes) in common. Considering specific expertise, Bioeco-Flies and Flies4Feed had agronomy and animal feed, respectively; ValoriBio had chemometrics, geology, science and material technology, agronomy, food technology and legal studies; Flies4Value had food technology, microbiology, animal feed, agronomy, GIS expertise, sociology; Scalibur had food technology, science and material technology and legal studies.

The prototypes built in ValoriBio (<https://www.valoribio.eu/en/>) aimed at optimizing BSF larvae rearing on chicken manure, water and chabazite (BORTOLINI *et al.*, 2020), and the adult conditions to maximize egg laying (MACAVEI *et al.*, 2020), including the development of a specific device for BSF egg laying, which has been patented (BENASSI *et al.*, 2018). Specific protocols have been developed for BSF larvae fractionation, performing also a life cycle analysis (LCA) (CALIGIANI *et al.*, 2018; 2019, ROSA *et al.*, 2020). BSF proteins have been used to develop a biodegradable bioplastic film (BARBI *et al.*, 2019; 2021) to be used as a mulch sheet (SETTI *et al.* 2020), while the frass has been evaluated as a soil conditioner in soilless production of potted baby leaf lettuce, basil and tomato plants (SETTI *et al.*, 2019).

The challenge of Bioeco-Flies (<https://progetti.crpv.it/Home/ProjectDetail/28>) was the valorization of seasonal agrifood by-products to rear BSF larvae year-round (Barbi *et al.*, 2020), assessing also the effect of the rearing substrate on total protein and amino acid composition of BSF larvae (FUSO *et al.*, 2021). The performance of BSF larvae was evaluated in a mass production prototype, the frass was tested on lettuce production and an LCA was performed (MAISTRELLO *et al.* 2020).

In Flies4Value (<https://flies4value.it/en>) an optimal mix of stabilized agri-food by-products was used to obtain carotenoid-rich BSF larvae (LENI *et al.*, 2022), which were used to formulate a specific feed for laying hens in order to obtain eggs with naturally red yolk. The project also evaluated the acceptability of eggs obtained from insect-fed laying hens by Italian consumers (LIPPI *et al.*, 2021) and developed a GIS-based Multi Criteria Decision Making analysis to evaluate the suitability of Emilia Romagna territory to the installation of insect farms (FIORILLO *et al.*, 2022).

In the European project Scalibur, the work package lead by UNIMORE was dedicated to obtaining proteins from municipal bio-waste using insects as bioconvert-

ers. The ValoriBio prototype for larvae was implemented for the mass rearing of BSF larvae on HO.RE.CA (hotel-restaurant-catering) waste (*i.e.* side streams from a canteen) and a new prototype for the insect fractionation was built. Other groups have evaluated the suitability of BSF larvae meal as an ingredient for dog food and the use of BSF chitin to develop innovative biomaterials for packaging (<https://scalibur.eu/resources/>).

In Flies4Feed ([http://flies4feed.crpv.it/nqcontent.cf-m?a\\_id=22320](http://flies4feed.crpv.it/nqcontent.cf-m?a_id=22320)), still in progress, thanks to the association between an insect farm prototype and a biogas production plant, the excess heat of the latter is exploited to breed BSF larvae on mill waste (SINISGALLI *et al.*, 2022). The BSF meal is then used to formulate specific feeds for trout and pigeons.

#### WHY IS INSECT FARMING NOT YET A REALITY IN ITALY?

In Europe, the use of insects as tools to upcycle organic side streams into valuable resources, thus putting the circular economy into practice, is severely limited by specific regulations (Reg. (EC) No 999/2001; Reg.

Project title and logo	Year, role	Funding program	Funding entity	Biomass used as substrate	Main outputs
<b>GO! Flies4Feed</b>	2021-2023 PI	Nazionale Plan 2014-2020 CA 14.104 - 011181 - Agri-2018	Italy Normanna Region	By-product of vegetable origin (strawberry fruit residues)	Prototypes for BSF rearing associated to biogas plant; optimization of BSF rearing; feed formulations for trout production
<b>BIOECO-FLIES</b>	2017-2020 PI	Nazionale Plan 2014-2020 CA 14.104 - 011181 - Agri-2018	Italy Normanna Region	By-products of vegetable origin (strawberry fruit residues)	Optimization of BSF rearing on seasonal substrates; optimization of BSF rearing; optimization of BSF rearing
<b>FLIES 4 VALUE</b>	2019-2022 Coordinator PI	EU Reg. Dec 1 and ERDF Progr 2014-2020 AFRI Reg. B. Intervention P2020L111111	Italy Normanna Region	Plant by-products (strawberry fruit residues) from star enterprises	Prototypes for BSF rearing; optimization of BSF rearing; optimization of BSF rearing; optimization of BSF rearing; optimization of BSF rearing
<b>ValoriBio</b>	2019-2020 Coordinator PI	EU Reg. Dec 1 and ERDF Progr 2014-2020 AFRI Reg. B. Intervention P2020L111111	Italy Normanna Region	Multi-substrate	Prototypes for BSF rearing; optimization of BSF rearing; optimization of BSF rearing; optimization of BSF rearing; optimization of BSF rearing
<b>SCALIBUR</b>	2018-2022 Participant	EU Reg. Dec 1 and ERDF Progr 2014-2020 AFRI Reg. B. Intervention P2020L111111	Italy Normanna Region	100% CA waste	Implementation of a rearing system for BSF; optimization of BSF rearing; optimization of BSF rearing; optimization of BSF rearing; optimization of BSF rearing

Fig. 3 - Applied research projects on the use of *Hermetia illucens* as bioconverter to valorise different types of biowaste. All project were carried out at the Applied Entomology Laboratory, Centro Interdipartimentale BIOGEST-SITEIA, UNIMORE (= Università di Modena e Reggio Emilia) (Role= role of L. Maistrello in the project, BSFL= black soldier fly larvae, A= adults, L= larvae)

(EC) No 767/2009) which prevent the use of manure and any substrate formally recognized as “waste”, including domestic and HO.RE.CA food waste, as feed for animals. These regulations apply to any type of farmed animals, and farmed insects are also subject to this rule. The primary concern is related to the safety of the insect meal and frass, in terms of heavy metals and other potentially dangerous contaminants. Although in the laboratory BSF larvae exhibited bioaccumulation of several elements, including metals, from optimal feed sources, a pilot-scale study showed that a former food-stuffs-based mixture resulted in a highly efficient and heavy metal-free production of BSF larvae and frass (GLIGORESCU *et al.*, 2022).

In any case, the insect farming sector for feed and food purposes is growing strongly in several European countries. According to the European interest organiza-

tion for insect producers (IPIFF), the annual production of insect protein in Europe is expected to be 3,000-5000 million kg/year in 2030 (<https://ipiff.org/>). Yet, in Italy, despite the great interest aroused by the aforementioned projects thanks to specific dissemination events and articles and during other initiatives organized by various bodies, the number of insect farms currently operating is limited to very few units.

The main reasons for this situation can essentially be traced back to a few issues. In the first place, an unclear legislation, mainly related to the subtle difference on what should be considered a by-product or waste (D. lgs. 152/2006 – TUA, art.184 bis; Regulation (EC) n. 1069/2009; Reg. (UE) n. 142/2011). Secondly, economic reasons, namely the need for large initial investments and the absence of a specific incentive system that favours this sector. Thirdly, the lack of specially trained personnel capable of deal with technical problems of insect farming. Finally, the difficulties in finding and connecting the right partners and stakeholders. In this regard, the creation of a specific network to connect all the elements of the new value chain would be highly desirable: from potential investors, to suppliers of suitable bio-waste, to the those who possess the necessary plant technology for insect farming and processing, to those who have the appropriate scientific knowledge and practical experience to carry out insect farming, to potential end users of insect proteins, fats, chitin, antimicrobial compounds and frass in various industrial and agricultural sectors.

## REFERENCES

- BARBI, S., MACAVEI L.I., CALIGIANI A., MAISTRELLO L., MONTORSI M., 2021 - *From Food Processing Leftovers to Bioplastic: A Design of Experiments Approach in a Circular Economy Perspective*. - Waste Biomass Valorization., 12: 5121–5130.
- BARBI S., MACAVEI L.I., FUSO A., LUPARELLI A.V., CALIGIANI A., FERRARI A.M, MAISTRELLO L., MONTORSI M., 2020. - *Valorization of seasonal agri-food leftovers through insects*. - Sci. Total Environ., 709: 136209.
- BARBI S., MESSORI M., MANFREDINI T., PINI M., MONTORSI M., 2019 - *Rational design and characterization of bioplastics from Hermetia illucens prepupae proteins*. - Biopolymers, 110: e23250.
- BENASSI M., BENASSI G., MAISTRELLO L., MACAVEI L.I., BORTOLINI S., HADJ SAADOUN J.H., 2018. - *Device for the deposition of eggs of Stratiomyidae Diptera and an apparatus for the breeding of Stratiomyidae Diptera comprising said device*. - Patent Application N. 102018000003261, filed March 3, 201.
- BESKIN K.V., HOLCOMB C.D, CAMMACK J.A., CRIPPEN T.L., KNAP A.H. SWEET S.T., TOMBERLIN J.K., 2018 - *Larval digestion of different manure types by the black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) impacts associated volatile emissions*. - Waste Manag., 74: 213–220.
- BORTOLINI S., MACAVEI L.I., SAADOUN J.H., FOCA G., ULRICI A., BERNINI F., MALFERRARI D., SETTI L. RONGA D., MAISTRELLO L., 2020 - *Hermetia illucens (L.) larvae as chicken manure management tool for circular economy*. - J. Clean. Prod., 262: 121289.
- CALIGIANI A., MARSEGLIA A., LENI, G., BALDASSARRE S., MAISTRELLO L., DOSSENA A., SFORZA S., 2018 - *Composition of black soldier fly prepupae and systematic approaches for extraction and fractionation of proteins, lipids and chitin*. - Food Res. Int., 105: 812–820.
- CALIGIANI A., MARSEGLIA A., SORCI A., BONZANINI F., LOLLI V., MAISTRELLO L., SFORZA S., 2019 - *Influence of the killing method of the black soldier fly on its lipid composition*. - Food Res. Int., 116: 276–282.
- EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, VAN DER LINDEN A., REICHEL A. 2020. - *Bio-waste in Europe: turning challenges into opportunities*. Publications Office of the European Union, LU.
- FAO, 2017 - *The future of food and agriculture: trends and challenges*. Food and Agriculture, Organization of the United Nations, Rome.
- FAO, 2019 - *The State of Food and Agriculture 2019 - Moving forward on food loss and waste reduction, The state of food and agriculture*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- FAO, 2021 - *Looking at edible insects from a food safety perspective*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- FIORILLO E., MAISTRELLO L., CHIECO C., 2022 - *GIS-based multi-criteria territorial suitability assessment for insect farms: a case study for North Italy*. - J. Insects Food Feed, 1–16.
- FUSO A., BARBI S., MACAVEI L.I., LUPARELLI A.V., MAISTRELLO L., MONTORSI M., SFORZA S., CALIGIANI C., 2021 - *Effect of the Rearing Substrate on Total Protein and Amino Acid Composition in Black Soldier Fly*. - Foods, 10: 1773.
- GLIGORESCU A., MACAVEI L.I., LARSEN B.F., MARKFOGED R., FISCHER C.H., KOCH J.D., JENSEN K., LAU HECKMANN L.-H., NØRGAARD J.V., MAISTRELLO L., 2022. - *Pilot scale production of Hermetia illucens (L.) larvae and frass using former foodstuffs*. - Clean. Eng. Technol., 10: 100546.
- GOLD M., TOMBERLIN J.K., DIENER S., ZURBRÜGG C., MATHYS A., 2018 - *Decomposition of biowaste macronutrients, microbes, and chemicals in black soldier fly larval treatment: A review*. - Waste Manag., 82: 302–318.
- GU D., ANDREEV K., DUPRE M. E., 2021 - *Major Trends in Population Growth Around the World. China*. - CDC Wkly., 3: 604–613.
- VAN HUIS A., 2020 - *Insects as food and feed, a new emerging agricultural sector: a review*. - J. Insects Food Feed, 6: 27–44.
- KACZOR M., BULAK P., PROC-PIETRYCHA K., KIRICHENKO-BABKO M., BIEGANOWSKI A., 2022 - *The Variety of Applications of Hermetia illucens in Industrial and Agricultural Areas—Review*. - Biology, 12: 25.
- LENI G., MAISTRELLO L., PINOTTI G., SFORZA S., CALIGIANI A., 2022 - *Production of carotenoid-rich Hermetia illucens larvae using specific agri-food by-products*. - J. Insects Food Feed, 1–12.

- LIPPI N., PREDIERI S., CHIECO C., DANIELE G.M, CIANCIA-BELLA M., MAGLI M., MAISTRELLO L., GATTI E., 2021 - *Italian Consumers' Readiness to Adopt Eggs from Insect-Fed Hens*. - *Animals*, 11: 3278.
- LOPES I.G., YONG J.W., LALANDER C., 2022 - *Frass derived from black soldier fly larvae treatment of biodegradable wastes. A critical review and future perspectives*. - *Waste Manag.*, 142: 65–76.
- MACAVEI L.I., BENASSI G., STOIAN V., MAISTRELLO L., 2020 - *Optimization of Hermetia illucens (L.) egg laying under different nutrition and light conditions*. - *PLOS ONE*, 15: e0232144.
- MAISTRELLO L., MACAVEI L.I., ANTONELLI A., MONTEVECCHI G., MASINO F., BARBI S., MONTORSI M., PINI M., FERRARI A.M., CALIGIANI A., SFORZA S., PAOLO P.P., AMADORI D., ALTAMURA V., TOMMASINI M.G., 2020 - *Sottoprodotti agroalimentari valorizzati con le mosche soldato*. - *L'Informatore Agrario*, 32: 56–59.
- MÜLLER A., WOLF D., GUTZEIT H.O., 2017 - *The black soldier fly, Hermetia illucens – a promising source for sustainable production of proteins, lipids and bioactive substances*. - *Z. Für Naturforschung C.*, 72: 351–363.
- ORDOÑEZ-ARAQUE R., QUISHPILO-MIRANDA N., RAMOS-GUERRERO L., 2022 - *Edible Insects for Humans and Animals: Nutritional Composition and an Option for Mitigating Environmental Damage*. - *Insects.*, 13: 944.
- POORE J., NEMECEK T., 2018 - *Reducing food's environmental impacts through producers and consumers*. - *Science*, 360: 987–992.
- RAVI H. K., DEGROU A., COSTIL J., TRESPEUCH C., CHEMAT F., VIAN M.A., 2020 - *Larvae Mediated Valorization of Industrial, Agriculture and Food Wastes: Biorefinery Concept through Bioconversion, Processes, Procedures, and Products*. - *Processes*, 8: 857.
- ROSA R., SPINELLI R., NERI P., PINI M., BARBI S., MONTORSI M., MAISTRELLO L., MARSEGLIA A., CALIGIANI A., FERRARI A. M., 2020 - *Life Cycle Assessment of Chemical vs Enzymatic-Assisted Extraction of Proteins from Black Soldier Fly Prepupae for the Preparation of Biomaterials for Potential Agricultural Use*. - *ACS Sustain. Chem. Eng.*, 8: 14752–14764.
- SETTI L., FRANCA E., PULVIRENTI A., DE LEO R., MARTINELLI S., MAISTRELLO L., MACAVEI L.I., MONTORSI M., BARBI S., RONGA D., 2020 - *Bioplastic Film from Black Soldier Fly Prepupae Proteins Used as Mulch: Preliminary Results*. - *Agronomy.*, 10: 933.
- SETTI L., FRANCA E., PULVIRENTI A., GIGLIANO S., ZACCARDELLI M., PANE C., CARADONIA F., BORTOLINI S., L. MAISTRELLO, RONGA D., 2019 - *Use of black soldier fly (Hermetia illucens (L.)), Diptera: Stratiomyidae) larvae processing residue in peat-based growing media*. - *Waste Manag.*, 95: 278–288.
- SINISGALLI E., SOLDANO M., GARUTI M., PICCININI S., PINOTTI G., MACAVEI L. I., MAISTRELLO L., 2022 - *Biogas e mosche soldato, sinergia interessante*. - *L'Informatore Agrario*, 25: 39-41.
- STENMARCK Å., JENSEN C., QUESTED T., MOATES G., BUKSTI M., CSEH B., JUUL S., PARRY A., POLITANO A., REDLINGSHOFER B., SCHERHAUFER S., SILVENNOINEN K., SOETHOUDT J.M, ZÜBERT C., ÖSTERGREN K., 2016 - *Estimates of European food waste levels*. IVL Swedish Environmental Research Institute.
- STORK N.E., 2018 - *How Many Species of Insects and Other Terrestrial Arthropods Are There on Earth?* - *Annu. Rev. Entomol.*, 63: 31–45.
- SURENDRA K.C., TOMBERLIN J.K., VAN HUIS A., CAMMACK J.A., HECKMANN L.-H.L., KHANAL S.K., 2020 - *Rethinking organic wastes bioconversion: Evaluating the potential of the black soldier fly (Hermetia illucens (L.)) (Diptera: Stratiomyidae) (BSF)*. - *Waste Manag.*, 117: 58–80.
- TZACHOR A., RICHARDS C.E., HOLT L., 2021- *Future foods for risk-resilient diets*. - *Nat. Food.*, 2: 326–329.

## NORME REDAZIONALI

I testi devono essere spediti per posta elettronica al Coordinatore della Redazione "Atti Accademia Entomologia" c/o CREA-DC, Centro di Ricerca per la Difesa e la Certificazione all'indirizzo mail:

rob.nannelli@gmail.com

I contenuti dei lavori sono di esclusiva responsabilità dell'Autore/i.

Il testo deve essere fornito in formato Word con l'estensione .doc oppure .docx (molto gradito anche il file salvato in formato PDF); il testo non deve contenere indicazioni di carattere redazionale e deve essere uniformato alle seguenti norme:

- Titolo, informativo ma conciso.
- Nome dell'Autore (o degli Autori).
- Istituto di appartenenza dell'Autore (o degli Autori) e indirizzo; e-mail dell'autore corrispondente.
- Titolo in inglese.
- Summary.
- Key words, in inglese, massimo cinque parole, che devono dare brevi informazioni integrative al titolo del lavoro.
- Testo del lavoro con ben indicato l'inizio e la fine di ogni capitolo; i rimandi bibliografici devono essere così indica-

ti: (Ramarkers, 1983) o Ramarkers (1983); (Riom e Gerbinot, 1977) oppure Deubert & Rhode (1971); (Robertson *et al.*, 1989).

- Eventuali ringraziamenti.
- Riassunto in italiano.
- Bibliografia indicata come da esempio:

Dallai R., 1975 – *Fine structure of the spermatheca of Apis mellifera*. - J. Insect Physiol., 21: 89-109.

Wallwork J.A., 1967 – *Acari*. In: Soil Biology, Burgers A. & Raw F. Ed., Academic Press, London, New York, pp. 365-395.

Hill D.S., 1987 – *Agricultural insect pests of the tropics and their control*. Cambridge University Press, XII+746 pp.

Nordlund D.A., Jones R.L., Lewis W.J. (Eds.), 1981 – *Semiochemical: their role in Pest control*. Wiley, N.Y., 850 pp.

Le figure e le relative didascalie devono essere indicate in cifre arabe (es. Fig. 1); devono essere fornite in formato JPG o TIFF. Per i grafici è preferito il formato PDF, le linee non dovrebbero essere più sottili di 0,25 pts e i retini avere una densità di almeno il 10%. Per le figure b/n sono ottimali risoluzioni di 600-1200 dpi, per le fotografie 300 dpi; le fotografie in JPG devono essere di buona qualità e dimensione tale da essere ridotte.