

Controllo microbico dei fitofagi in agricoltura

A cura di

**Vincenzo Michele Sellitto, Luca Ruiu
Eustachio Tarasco**



edagricole

1ª edizione: maggio 2026

Il disegno di Figura 6.3 è di Carlotta Marianelli. Con il titolo “Storia di un entomopatogeno”, è risultato secondo classificato al concorso a premi NemArt “Il bello dei Nematodi”, promosso dalla Società Italiana di Nematologia (SIN).

 **tecniche nuove**

© Copyright 2026 by “Edagricole – Edizioni Agricole di Tecniche Nuove S.p.A.”, via Eritrea, 21 – 20157 Milano

Redazione: p.zza G. Galilei, 6 – 40123 Bologna Vendite: tel. 051 6575833;

email: libri.edagricole@tecnicenuove.com – www.edagricole.it

Proprietà letteraria riservata – printed in Italy

La riproduzione con qualsiasi processo di duplicazione delle pubblicazioni tutelate dal diritto d'autore è vietata e penalmente perseguibile (art. 171 della legge 22 aprile 1941, n. 633). Quest'opera è protetta ai sensi della legge sul diritto d'autore e delle Convenzioni internazionali per la protezione del diritto d'autore (Convenzione di Berna, Convenzione di Ginevra). Nessuna parte di questa pubblicazione può quindi essere riprodotta, memorizzata o tra-smessa con qualsiasi mezzo e in qualsiasi forma (fotomeccanica, fotocopia, elettronica, ecc.) senza l'autorizzazione scritta dell'editore. In ogni caso di riproduzione abusiva si procederà d'ufficio a norme di legge.

5690

Realizzazione grafica: Lucio Elio Berardinelli, Via Filippo Schiassi, 11 – 40138 Bologna
Impianti e stampa: DIGITALTEAM srl – Via dei Platani, 4 – 61032 Fano (PU)

Finito di stampare nel maggio 2026

ISBN-978-88-506-5690-5

Hanno collaborato

Gian Paolo Barzanti, Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria, Centro di ricerca Difesa e Certificazione (CREA-DC)

Massimo Benuzzi, Biogard divisione di CBC (Europe) s.r.l.

Claudia Benvenuti, Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria, Centro di ricerca Difesa e Certificazione (CREA-DC)

Edith Ladurner, Biogard divisione di CBC (Europe) s.r.l.

Barbara Manachini, Dipartimento Scienze Agrarie, Alimentari e Forestali (SAAF), Università degli Studi di Palermo

Leonardo Marianelli, Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria, Centro di ricerca Difesa e Certificazione (CREA-DC)

Pio Federico Roversi, Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria, Centro di ricerca Difesa e Certificazione (CREA-DC)

Luca Ruiu, Dipartimento di Agraria, Università degli Studi di Sassari

Eustachio Tarasco, Dipartimento di Scienze del Suolo della Pianta e degli Alimenti (DiSSPA), Università di Bari Aldo Moro

Vincenzo Michele Sellitto, L.G.Italia srl, Museo del Suolo – Pertosa, Accademia dei Georgofili

Giulia Torrini, Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria, Centro di ricerca Difesa e Certificazione (CREA-DC)

Indice

| | |
|--|-----------|
| Introduzione (<i>V.M. Sellitto, E. Tarasco, L. Ruiu</i>) | 1 |
| Il mercato del Biocontrollo | 3 |
| Entomopatogeni, ruolo ecosistemico e introduzione al volume | 4 |
| Controllo microbico: aspetti normativi e di sicurezza | 13 |
| | |
| PARTE I – Fondamenti | 15 |
| | |
| 1. Ecologia e ruolo ecosistemico degli entomopatogeni (<i>L. Ruiu</i>) | 17 |
| 1.1 Generalità ed ecologia dei microrganismi | 17 |
| 1.2 Da decompositori a entomopatogeni | 18 |
| 1.3 Interazioni tra microrganismi e parassiti delle piante | 19 |
| 1.4 Gli entomopatogeni negli ecosistemi naturali | 20 |
| Bibliografia | 21 |
| | |
| 2. Coevoluzione: dinamiche evolutive negli agroecosistemi (<i>V.M. Sellitto</i>) | 23 |
| 2.1 Introduzione | 23 |
| 2.2 Coevoluzione tra entomopatogeni e insetti ospiti | 24 |
| 2.3 Nematodi entomopatogeni, batteri simbiotici e insetti ospiti: una coevoluzione a tre vie | 26 |
| 2.4 Funghi entomopatogeni e insetti: un mosaico di adattamenti | 27 |
| 2.5 CPGV e <i>Cydia pomonella</i> : un esempio concreto di coevoluzione ospite-patogeno | 28 |
| 2.6 <i>Bacillus thuringiensis</i> e insetti: un'interazione coevolutiva in atto sotto effetto antropico | 29 |
| 2.7 Evoluzione funzionale condivisa: un confronto tra <i>Pochonia</i> e <i>Beauveria</i> | 31 |
| 2.8 Conclusioni | 31 |
| Bibliografia | 32 |

| | |
|--|-----------|
| PARTE II – Agenti microbici contro gli insetti | 35 |
| 3. I virus entomopatogeni (M. Benuzzi, E. Ladurner) | 37 |
| 3.1 Generalità, sistematica e meccanismi di azione | 37 |
| 3.2 Pratica e applicazioni | 39 |
| 3.2.1 CpGV, Virus della Granulosa della Carpocapsa | 39 |
| 3.2.2 AdorGV, Virus della Granulosa della Capua | 41 |
| 3.2.3 Hear NPV, Virus della Nucleopoliedrosi di <i>Helicoverpa armigera</i> | 41 |
| 3.2.4 SpliNPV, Nucleopoliedrovirus di <i>Spodoptera littoralis</i> | 42 |
| 3.3 Impiego pratico | 43 |
| 3.4 Produzione e commercializzazione | 44 |
| Bibliografia | 45 |
| 4. Batteri entomopatogeni (L. Ruiu) | 47 |
| 4.1 Generalità, sistematica e meccanismi di azione | 47 |
| 4.2 Batteri Gram-positivi e sporigeni | 48 |
| 4.2.1 Famiglia Bacillaceae | 48 |
| 4.2.2 Famiglia Paenibacillaceae | 50 |
| 4.3 Batteri Gram-negativi | 51 |
| 4.3.1 Genere <i>Pseudomonas</i> | 51 |
| 4.3.2 Genere <i>Serratia</i> | 52 |
| 4.3.3 Genere <i>Yersinia</i> | 52 |
| 4.3.4 Generi <i>Photobacterium</i> e <i>Xenorhabdus</i> | 52 |
| 4.3.5 Generi <i>Burkholderia</i> e <i>Chromobacterium</i> | 53 |
| 4.3.6 Generi <i>Streptomyces</i> , <i>Saccharopolyspora</i> e i loro metaboliti | 53 |
| 4.4 Nomenclatura delle proteine insetticide di origine batterica | 54 |
| 4.5 Batteri promotori della crescita delle piante (PGPB) | 55 |
| 4.6 Pratica e applicazioni | 56 |
| 4.6.1 Produzione e commercializzazione | 60 |
| Bibliografia | 62 |
| 5. Funghi Entomopatogeni nel controllo dei parassiti: principi e applicazioni (G.P. Barzanti, C. Benvenuti, P.F. Roversi, E. Tarasco) | 65 |
| 5.1 Generalità, sistematica e meccanismi di azione | 65 |
| 5.1.1 Generalità | 65 |
| 5.1.2 Sistematica | 66 |
| 5.1.3 Meccanismi di azione | 68 |
| 5.2 Pratica e applicazioni | 76 |
| 5.2.1 Modalità di applicazione e controllo a lungo termine | 76 |
| 5.2.2 Ambiente e relativo sviluppo | 78 |
| 5.2.3 Sviluppi e prospettive oltre la realtà attuale | 79 |
| 5.3 Produzione e commercializzazione | 82 |

| | |
|--|------------|
| Bibliografia | 87 |
| Sitografia | 90 |
| 6. Nematodi entomoparassiti ed entomopatogeni (<i>G. Torrini, L. Marianelli, P.F. Roversi, E. Tarasco</i>) | 91 |
| 6.1 Generalità, sistematica e meccanismi di azione | 91 |
| 6.1.1 Storia | 92 |
| 6.1.2 Sistematica | 93 |
| 6.1.3 Biologia | 94 |
| 6.1.4 Batteri simbiotici | 97 |
| 6.1.5 Ricerca dell'ospite, strategie di attacco e reazioni degli insetti | 99 |
| 6.2 Produzione e commercializzazione | 101 |
| 6.2.1 Produzione | 101 |
| 6.2.2 Formulazione, trasporto e stoccaggio | 102 |
| 6.3 Pratica e applicazioni | 104 |
| 6.3.1 Attrezzature | 104 |
| 6.3.2 Procedura applicativa | 104 |
| 6.3.3 Tecniche alternative di applicazione | 106 |
| 6.3.4 Parametri che influenzano l'efficacia del trattamento | 107 |
| 6.4 Nematodi parassiti dei molluschi | 108 |
| 6.4.1 <i>Phasmarhabditis hermaphrodita</i> | 108 |
| 6.4.2 <i>Phasmarhabditis californica</i> | 110 |
| 6.4.3 Metodi di applicazione | 110 |
| Bibliografia | 110 |
| Appendice al capitolo 6 | 113 |
| PARTE III – Quadro regolatorio | 125 |
| 7. Regolamentazione e sicurezza degli agenti di controllo (micro) biologico dei parassiti (<i>B. Manachini</i>) | 127 |
| 7.1 Per non fare confusione partiamo dalla definizione | 127 |
| 7.1.1 Agenti di controllo biologico degli invertebrati (IBCA) contro i parassiti delle piante | 129 |
| 7.1.2 Le basi legali della registrazione dei MBCAs e la loro evoluzione | 129 |
| 7.2 Il Regolamento (UE) 2022/1438 della Commissione | 132 |
| 7.2.1 Pro e Contro del Regolamento della Commissione (UE) 2022/1438 | 133 |
| 7.3 Nuove considerazioni sulla Valutazione del Rischio dei MBCA e formulazione del problema | 135 |
| 7.3.1 <i>Problem formulation</i> e <i>Risk Assessment</i> | 136 |
| 7.3.2 <i>Problem formulation</i> e Indicatori di patogenicità | 139 |
| 7.3.3 Armonizzazione del Problem Formulation e dell'approccio caso per caso per la valutazione del rischio | 141 |

Indice

| | | |
|-------|--|-----|
| 7.3.4 | Vie espositive e “percorsi del danno” | 141 |
| 7.3.5 | Obiettivi di protezione | 142 |
| 7.4 | Presunzione qualificata di sicurezza (QPS) ed il ruolo dell’EFSA | 142 |
| 7.5 | Applicabilità del controllo biologico dal campo alla tavola | 144 |
| 7.6 | Effetti positivi dei MBCA sull’ambiente | 145 |
| 7.7 | Osservazioni conclusive | 146 |
| | Bibliografia | 146 |

Introduzione

Vincenzo Michele Sellitto, Eustachio Tarasco, Luca Ruiu

Il **biocontrollo** rappresenta un approccio sostenibile nel controllo integrato basato sull'uso di organismi naturali o delle loro sostanze attive (es. metaboliti) per limitare la diffusione di **fitoparassiti (insetti, acari, nematodi ecc.) e patogeni delle piante (funghi, batteri, virus, ecc.)**. Questo metodo si distingue dalle strategie chimiche convenzionali per la sua maggiore selettività, un minore impatto ambientale e la capacità di integrarsi nei programmi di gestione integrata dei parassiti (*Integrated Pest Management*, IPM).

Il **biocontrollo dei fitoparassiti** si divide in due grandi categorie principali: **Biocontrollo microbico**, basato sull'uso di batteri, funghi, virus per contrastare i fitoparassiti e **Biocontrollo con macrorganismi**, che sfrutta insetti predatori, parassitoidi e nematodi entomopatogeni (anche se questi ultimi possono essere annoverati anche tra gli agenti di controllo microbico per la loro simbiosi mutualistica con i batteri) per ridurre le popolazioni di parassiti in modo naturale.

Il **biocontrollo microbico** è oggi una delle strategie più promettenti per la gestione sostenibile dei fitoparassiti in agricoltura. L'uso di microrganismi per contrastare insetti dannosi, nematodi e patogeni delle piante ha una lunga storia, con i primi esperimenti documentati già nel XIX secolo. Tuttavia, è solo negli ultimi decenni che questa tecnologia ha conosciuto un'adozione su vasta scala, trainata dall'innovazione scientifica e dalla crescente esigenza di ridurre l'impatto ambientale delle attività agricole. Il biocontrollo microbico rappresenta un'alternativa ai pesticidi chimici tradizionali, i cui effetti collaterali sulla biodiversità, sulla salute umana e sulla qualità del suolo hanno portato a normative sempre più stringenti e alla ricerca di soluzioni più selettive ed ecocompatibili. In questo contesto, **micro e macrorganismi per il controllo dei fitoparassiti** sono diventati protagonisti di una nuova era nella protezione delle colture, offrendo un controllo efficace sui parassiti agricoli e riducendo al minimo i rischi per organismi non bersaglio.

Tra i microrganismi più utilizzati nell'ambito del biocontrollo, *Bacillus thuringiensis* (Bt) è stato uno dei primi bioinsetticidi ad entrare nel mercato e rimane tra i più diffusi grazie alla sua capacità di produrre tossine altamente specifiche contro larve di lepidotteri, coleotteri e ditteri. Il Bt ha rivoluzionato il settore del biocontrollo sin dagli anni '70, quando i progressi nella fermentazione in-

dustriale hanno reso possibile la sua produzione su larga scala. Oltre ai batteri, anche i funghi entomopatogeni come *Beauveria bassiana* e *Metarhizium anisopliae* hanno guadagnato importanza nel controllo biologico degli insetti, grazie alla loro capacità di infettare una vasta gamma di ospiti e di agire sia sugli adulti che sulle larve. Questi funghi penetrano nella cuticola degli insetti, producendo tossine letali e portando alla loro morte nel giro di pochi giorni. A differenza del Bt, che deve essere ingerito, i funghi entomopatogeni agiscono per contatto, un vantaggio che li rende particolarmente efficaci nel controllo di parassiti difficili da raggiungere con trattamenti chimici convenzionali. Tuttavia, la loro maggiore esposizione e sensibilità a fattori come la temperatura, umidità e alle radiazioni UV ha richiesto lo sviluppo di nuove formulazioni avanzate con oli e agenti protettivi.

Anche i virus entomopatogeni, in particolare i baculovirus, stanno giocando un ruolo chiave nel biocontrollo. Questi virus a DNA infettano specificamente gli insetti, causando infezioni letali che interrompono l'alimentazione e portano alla morte dell'ospite. A differenza di molti altri biopesticidi, i baculovirus mostrano un livello di specificità straordinario, con alcuni ceppi che colpiscono esclusivamente una singola specie di parassita rendendoli particolarmente sicuri per gli organismi non target. Un limite dei baculovirus è la loro velocità di azione più lenta rispetto agli insetticidi chimici, un fattore che può renderne l'adozione meno immediata tra gli agricoltori abituati a risultati rapidi.

Inoltre, un gruppo di organismi di crescente interesse nell'ambito del biocontrollo tramite macroorganismi è rappresentato dai **nematodi entomopatogeni**. A differenza di batteri, funghi e virus, questi sono macroorganismi che agiscono però in simbiosi con batteri patogeni, i quali rappresentano la ragione della loro infettività per gli insetti, giustificandone la presenza nel novero degli agenti di controllo microbico all'interno di questo volume. Le specie appartenenti alle famiglie Heterorhabditidae e Steinernematidae sono state ampiamente studiate e vengono utilizzate con successo in programmi di biocontrollo contro parassiti del suolo e insetti fogliari. I generi *Heterorhabditis* e *Steinernema* instaurano una relazione mutualistica con batteri del genere *Photorhabdus* e *Xenorhabdus*, rispettivamente. Quando lo stadio giovanile infettivo del nematode penetra in un insetto ospite, rilascia questi batteri simbiotici, che si moltiplicano rapidamente all'interno dell'insetto, causandone la morte in pochi giorni. Questo meccanismo permette ai nematodi di sfruttare il corpo dell'ospite come fonte di nutrimento e di rilasciare successivamente una nuova generazione di individui infettivi nel suolo, perpetuando il ciclo di infezione. I nematodi entomopatogeni si sono dimostrati particolarmente efficaci contro larve di coleotteri, ditteri e lepidotteri, trovando il loro utilizzo per il controllo biologico di insetti terricoli.

Un aspetto interessante del biocontrollo tramite micro e macroorganismi è la loro integrazione nei moderni sistemi di **gestione integrata dei parassiti (IPM)**, in cui vengono spesso utilizzati in rotazione con prodotti chimici convenzionali per ridurre la comparsa di resistenze nei parassiti.

Nonostante i numerosi vantaggi, il biocontrollo microbico deve ancora affrontare

alcune sfide per affermarsi pienamente come alternativa dominante ai pesticidi chimici, tra cui la necessità di monitorare attentamente le popolazioni di parassiti e applicare il biocontrollo nei momenti ottimali del ciclo biologico del patogeno, un aspetto che richiede maggiore formazione e assistenza tecnica. Inoltre, le normative stringenti in alcune regioni, come l'Unione Europea, hanno rallentato l'introduzione di nuovi prodotti microbici, nonostante la crescente domanda di soluzioni ecocompatibili.

Il mercato del Biocontrollo

Nel complesso, il mercato del biocontrollo microbico è in forte espansione e sta rapidamente trasformando il panorama della protezione delle colture. Con il progresso delle biotecnologie, l'ottimizzazione dei processi di fermentazione e lo sviluppo di formulazioni più efficaci e stabili, il biocontrollo microbico si candida a diventare una delle colonne portanti dell'agricoltura del futuro, offrendo soluzioni efficaci, sostenibili e sempre più accessibili agli agricoltori di tutto il mondo. Negli ultimi dieci anni, il mercato globale del biocontrollo ha registrato una crescita sostenuta a doppia cifra, grazie alla crescente domanda di alternative sostenibili agli agrofarmaci chimici. Tuttavia, questa espansione non è stata omogenea, infatti, se da un lato il Nord America e l'Europa hanno visto una progressiva stabilizzazione del mercato dall'altro l'America Latina e l'Asia stanno emergendo come i nuovi protagonisti della crescita globale, trainate dall'adozione crescente del biocontrollo nelle colture estensive. Questa evoluzione sta portando a una redistribuzione delle quote di mercato, con una progressiva perdita di peso da parte di Europa e Nord America a favore dei paesi dell'America Latina e Asia. L'Europa, che nel 2021 rappresentava il 25% del mercato globale del biocontrollo, è destinata a vedere la propria quota scendere al 19% nei prossimi anni. Questo calo relativo non significa una contrazione del settore, anzi, il valore assoluto del mercato europeo è destinato a crescere. Tuttavia, la crescita è frenata da ostacoli normativi che rendono difficile l'introduzione di nuovi prodotti microbici.

L'Unione Europea, pur promuovendo politiche di riduzione dell'uso dei pesticidi chimici attraverso il *Green Deal* e la strategia *Farm to Fork*, non ha ancora reso il quadro normativo favorevole all'adozione su larga scala del biocontrollo microbico, che risulta meno diffuso rispetto ad altre regioni del mondo. La Francia e la Spagna, seguite dall'Italia, rappresentano i mercati più forti in Europa e continueranno a guidare il settore, anche se la crescita più dinamica si sta spostando verso l'Europa centrale e orientale, dove l'interesse per il biocontrollo è in aumento. A livello globale, il mercato sta entrando in una fase di rallentamento, con un tasso di crescita che si mantiene positivo ma inferiore rispetto agli anni precedenti. Il mantenimento di una crescita solida dipenderà in gran parte dalla capacità delle regioni dell'emisfero settentrionale, come l'Europa e il Nord America, di espandere l'uso dei prodotti di biocontrollo anche nelle colture estensive.

Entomopatogeni, ruolo ecosistemico e introduzione al volume

Nell'ambito del biocontrollo, gli entomopatogeni, ovvero gli agenti patogeni degli insetti, rivestono un ruolo di grande importanza. Si tratta di organismi appartenenti a gruppi diversi, come batteri e funghi, forme pluricellulari come i nematodi (spesso indicati come macrorganismi) e forme biologiche più semplici come i virus, capaci di causare malattie negli insetti ospiti fino a determinarne la morte. Le relazioni ecologiche tra entomopatogeni e insetti sono il risultato di un lungo processo evolutivo, che ha portato questi organismi a sviluppare strategie efficaci per superare le difese immunitarie dell'ospite. Per i microrganismi entomopatogeni, l'insetto rappresenta infatti una risorsa fondamentale per la propria sopravvivenza e riproduzione. Inoltre, gli entomopatogeni svolgono anche un ruolo ecologico primario come decompositori, contribuendo in modo determinante ai cicli biogeochimici del suolo all'interno di una complessa rete di interazioni con gli altri organismi dell'ecosistema. Svolgono inoltre un ruolo naturale di contenimento delle popolazioni di insetti nocivi in agricoltura. Gli agroecosistemi, infatti, si mantengono funzionali grazie a equilibri dinamici, nei quali ogni specie, pur cercando di affermarsi, deve confrontarsi con risorse limitate e con fenomeni di competizione e antagonismo biologico. L'azione antropica, semplificando queste reti di interazione, può alterare tali equilibri favorendo la proliferazione di fitoparassiti delle colture, con conseguenti perdite produttive ed economiche. Questo scenario ha giustificato il forte sviluppo dell'industria dei prodotti fitosanitari chimici. Tuttavia, le crescenti preoccupazioni per l'impatto ambientale e per i rischi sulla salute umana associati all'uso di queste molecole hanno progressivamente orientato l'opinione pubblica e il legislatore verso politiche di maggiore tutela ambientale.

In questo contesto, l'interesse per l'impiego dei microrganismi entomopatogeni come sostanze attive nei prodotti fitosanitari, in particolare quelli ammessi in agricoltura biologica, è andato aumentando. Oggi rappresentano una prospettiva concreta e promettente per una difesa fitosanitaria più sostenibile, anche grazie ai continui progressi della ricerca scientifica e dello sviluppo tecnologico.

Le moderne tecnologie e la strumentazione oggi disponibili consentono di approfondire i meccanismi di interazione tra ospite e patogeno, mettendo in evidenza un'ampia diversità di specie, di ceppi all'interno della stessa specie e di fattori di virulenza che caratterizzano ciascun entomopatogeno. Da queste conoscenze deriva un crescente interesse applicativo e industriale, orientato allo sviluppo di nuove "biosoluzioni" sempre più efficaci e mirate per l'agricoltura del futuro. In questo volume verranno trattati separatamente Virus, Batteri, Funghi e Nematodi entomopatogeni, di maggiore interesse e successo in agricoltura.

I Virus (Vedi capitolo 3), come noto, sono forme viventi estremamente semplici che hanno bisogno della cellula ospite per svilupparsi. Gli entomopatogeni di maggiore interesse appartengono alla **famiglia Baculoviridae**, virus con DNA

circolare a doppio filamento, in cui l'acido nucleico è protetto da un capsidico proteico e un involucro lipidico più esterno (Fig. 1).

Il virus normalmente penetra nell'intestino dell'ospite attraverso l'alimentazione come corpo di occlusione (OBs) cristallina in cui il virione è immerso in una matrice proteica contenente fattori di virulenza che gli consentono di superare le prime barriere dell'ospite (Fig. 2). Una volta conquistata la cellula epiteliale, i virioni assumono un secondo fenotipo che gli consentirà di diffondere l'infezione all'interno dell'organismo ospite.

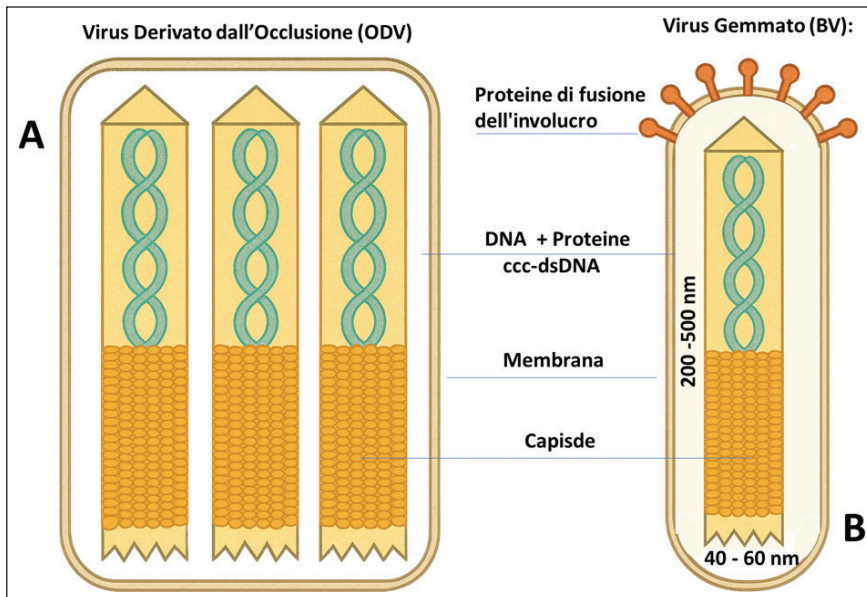


Figura 1 – Rappresentazione schematica dei due principali fenotipi del virione del baculovirus, fondamentali per la sopravvivenza ambientale e la diffusione dell'infezione nell'ospite. Il virus derivato dall'occlusione (ODV) è incorporato nei **corpi di occlusione (OBs)**, strutture proteiche composte da poliedrina o granulina, sintetizzate in grandi quantità durante la fase tardiva dell'infezione. Gli OBs conferiscono elevata stabilità ambientale ai virioni e consentono la trasmissione orale dell'infezione tra ospiti larvali. Il virus gemmato (BV), invece, è un virione extracellulare non occluso, ed è responsabile della diffusione sistemica dell'infezione all'interno dei diversi tessuti della larva ospite. (vedere Figura 2). Nonostante le differenze funzionali e di involucro, entrambi i fenotipi presentano una struttura interna comune, costituita da un nucleocapside avvolto di forma cilindrica (30-60 nm di diametro e 250-500 nm di lunghezza), contenente un genoma formato da una singola molecola di DNA circolare a doppio filamento chiuso covalentemente (ccc-dsDNA), con dimensioni comprese tra 80 e 180 kbp. (Figura modificata da Harrison et al., ICTV Report Consortium), *Journal of General Virology* (DOI: 10.1099/jgv.0.001107).

Sulla base della morfologia dei corpi di occlusione e della loro filogenesi si distinguono in *Alphabaculovirus*, *Betabaculovirus* (conosciuti in passato come *Granulovirus*), *Gammabaculovirus* e *Deltabaculovirus*.

L'interazione tra i baculovirus e il loro ospite è altamente specifica e frutto di un processo co-evolutivo, il che rende i virus entomopatogeni utili per la gestione del loro ospite. Questo li rende anche selettivi e con un ottimo profilo ecotossicologico.

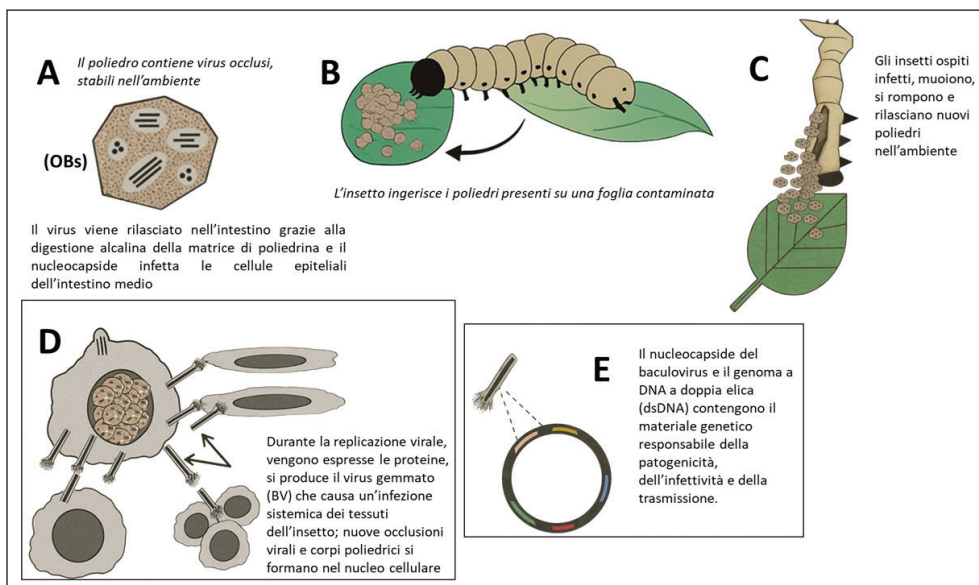


Figura 2 – Il ciclo inizia quando i corpi di occlusione (OBs), che contengono particelle infettive, vengono ingeriti dalle larve ospiti dei lepidotteri mentre si nutrono del fogliame. Gli OBs sono anche conosciuti come poliedri (per i generi *Alphabaculovirus*, *Gammabaculovirus* e *Deltabaculovirus*) o granuli (per il genere *Betabaculovirus*). La matrice paracristallina degli OBs, composta dalla proteina virale poliedrina o granulina, si **dissolve nell'ambiente alcalino dell'intestino medio larvale**. I virioni liberati da questa dissoluzione sono chiamati **virus derivati dall'occlusione (ODV)**. Questi ODV stabiliscono l'infezione primaria nelle cellule epiteliali colonnari dell'intestino medio della larva. L'infezione si diffonde successivamente ad altri tessuti ospiti attraverso un secondo tipo di virione prodotto durante la replicazione virale, noto come **virus gemmato (BV)**. L'infezione e la replicazione virale sono associate a una malattia caratteristica, denominata poliedrosi nucleare o granulosa. Le cellule infette lisano e l'anatomia interna della larva viene liquefatta, mentre la cuticola si indebolisce a causa degli enzimi degradativi codificati dal virus. La morte della larva per la malattia virale si conclude con la rottura della cuticola e la **liberazione degli OBs della progenie** prodotti durante l'infezione. (Modifica su disegno di **Jeremy A. Kroemer, Bryony C. Bonning e Robert L. Harrison**, come pubblicato nella rivista **Viruses** 2015, 7, 422-455).

| Tabella 1 – Virus entomopatogeni (baculovirus) usati come bioinsetticidi – L’elenco riporta diversi virus specifici per lepidotteri fitofagi, distinguendo tra quelli attualmente utilizzati in Italia e (**) e quelli impiegati in altri paesi (*). I virus appartengono principalmente ai gruppi Alphabaculovirus e Betabaculovirus, e trovano applicazione nei programmi di difesa biologica o integrata su colture agricole e forestali. | |
|--|-------------|
| <i>Adoxophyes orana</i> granulovirus | (AdorGV)** |
| <i>Autographa californica</i> multiple nucleopolyhedrovirus | (AcMNPV)* |
| <i>Chrysodeixis includens</i> nucleopolyhedrovirus | (ChinNPV)* |
| <i>Cydia pomonella</i> granulovirus | (CpGV)** |
| <i>Helicoverpa armigera</i> nucleopolyhedrovirus | (HearNPV)** |
| <i>Helicoverpa zea</i> nucleopolyhedrovirus | (HzNPV)* |
| <i>Lymantria dispar</i> multiple nucleopolyhedrovirus | (LdMNPV)* |
| <i>Phthorimaea operculella</i> granulovirus | (PhopGV)* |
| <i>Plutella xylostella</i> granulovirus | (PlxyGV)* |
| <i>Spodoptera exigua</i> multiple nucleopolyhedrovirus | (SeMNPV)* |
| <i>Spodoptera frugiperda</i> multiple nucleopolyhedrovirus | (SfMNPV)* |
| <i>Spodoptera littoralis</i> nucleopolyhedrovirus | (SpliNPV)** |
| <i>Cryptophlebia leucotreta</i> granulovirus – specifico per <i>Thaumatotibia leucotreta</i> (sin. <i>Cryptophlebia leucotreta</i>). | (CrleGV)* |

I batteri entomopatogeni sono procarioti unicellulari, di dimensioni molto variabili (0,1-20 μm) (**Vedi capitolo 4**), anch’essi attivi per ingestione, dotati di strumenti molecolari che gli permettono di superare le barriere intestinali come la matrice peritrofica e l’epitelio dell’insetto ospite. Il meccanismo di infezione coinvolge una ampia varietà di proteine insetticide e fattori di virulenza batterici come gli enzimi degradativi, che hanno lo scopo di aprire la strada verso i tessuti interni e il sangue (emolinfa) dell’ospite ricchi di sostanze nutritive in cui i batteri possono proliferare e riprodursi causando setticemia (Fig. 3). Proprio l’interesse per i geni codificanti per le proteine insetticide di origine batterica, tra cui primeggiano le cosiddette proteine Cry del *Bacillus thuringiensis*, ha alimentato l’industria produttrice in virtù dell’elevato potenziale applicativo.

Infatti, le tossine di *Bacillus thuringiensis* (Bt) hanno mostrato un grande potenziale nel controllo degli insetti dannosi, e sono utilizzate come principale agente biologico per la formulazione di bioinsetticidi grazie alla loro specificità verso diversi ordini di insetti target come Lepidotteri, Coleotteri, Emittteri, Ditteri, nematodi (Rhabditida) e contro cellule tumorali umane di diversa origine. Questo ha portato i prodotti a base di Bt a diventare i bioinsetticidi più venduti al mondo. Attualmente esistono più di 98 formulazioni di pesticidi batterici spray che rappresentano gli insetticidi più comunemente usati, nel rispetto dell’ambiente. Nello specifico il *Bacillus thuringiensis* è un batterio ubiquitario gram-positivo, a

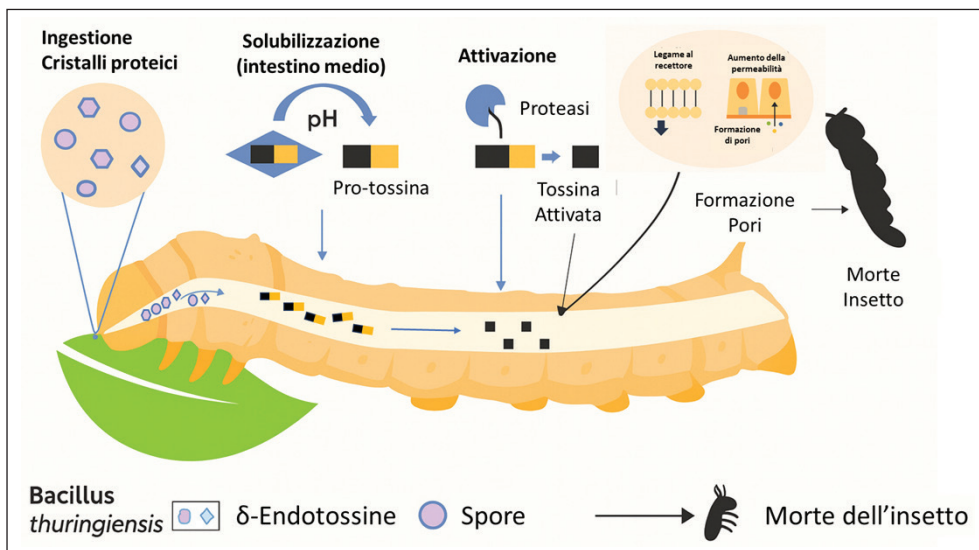


Figura 3 – Meccanismo d'azione delle tossine Cry di *Bacillus thuringiensis* negli insetti bersaglio. Dopo l'ingestione di spore e δ -endotossine, i cristalli vengono solubilizzati nel lume intestinale in ambiente alcalino. Le proto-tossine vengono quindi attivate dalle proteasi dell'intestino medio, generando tossine Cry attive. Le tossine attivate si legano a recettori specifici dell'epitelio intestinale, inducendo la formazione di pori nella membrana cellulare e un aumento della permeabilità. La conseguente perdita dell'equilibrio osmotico porta alla lisi delle cellule intestinali, alla paralisi dell'intestino e, infine, alla morte dell'insetto.

forma di bastoncello, isolato in tutto il mondo da una vasta varietà di ecosistemi, soprattutto dal suolo, ma anche dagli insetti morti e dalla vegetazione. Non tutti gli isolati possiedono attività insetticida, poiché tale caratteristica dipende dalla presenza e dal tipo di proteine tossiche prodotte.

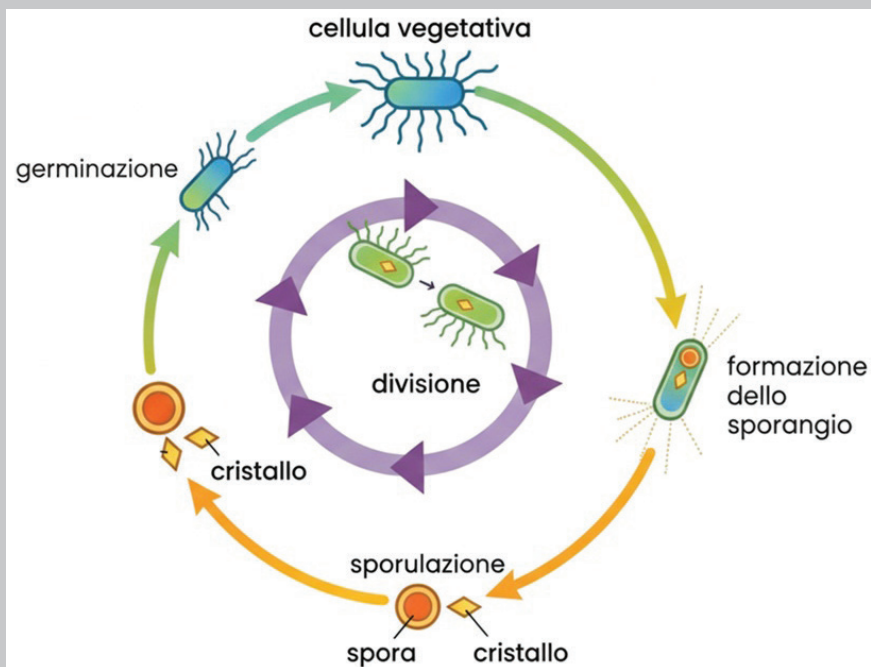
I funghi entomopatogeni (**Vedi capitolo 5**) sono microrganismi eucarioti molto frequenti negli agroecosistemi essendo anche parte del microbioma del suolo svolgendo un ruolo di decompositori insieme ai batteri. Numerose sono le specie di interesse come entomopatogeni tra cui primeggiano i generi *Beauveria*, *Metarhizium*, *Isaria* e *Akanthomyces* che includono specie già commercializzate come agenti di controllo biologico di diversi insetti target in varie parti del mondo. I funghi tipicamente agiscono sull'ospite per contatto, ossia l'infezione prende origine dall'adesione di un conidio fungino sulla superficie del corpo dell'ospite, cui segue la penetrazione per azione meccanica e enzimatica, che permetterà al fungo di diffondersi nell'ospite tramite ife e speciali propaguli. In condizioni ambientali idonee i funghi producono sul corpo dell'ospite un tipico micelio e nuovi conidi aeriferi che ne permetteranno la diffusione ambientale. Si formano così le ben note mummie che caratterizzano la sintomatologia esterna e più conosciuta della malattia. Anche in questo caso, il processo di patogenesi

è complesso e coadiuvato da una molteplicità di proteine, enzimi, metaboliti e svariati fattori di virulenza che caratterizzano ciascuna specie entomopatogena e la sua interazione con l'ospite (Fig. 4).

I nematodi entomopatogeni (Capitolo 6), rappresentano un particolare gruppo di nematodi che svolgono un'azione patogenica nei confronti di insetti, grazie ad una simbiosi con batteri patogeni evolutisi per sfruttare il nematode come vettore per l'ingresso nell'emocele dell'ospite. In questo caso, l'azione nei confronti

SVILUPPO DI *BACILLUS THURINGIENSIS*

Il ciclo di sviluppo di *Bacillus thuringiensis* presenta una fase vegetativa, in cui le cellule si moltiplicano secondo un modello di crescita esponenziale, e una fase successiva in cui, per carenza di nutrienti, si avvia la sporulazione con trasformazione delle cellule in sporangi. Ogni sporangio contiene una spora e uno o più cristalli proteici: la formazione dei cristalli inizia nelle prime fasi della sporulazione e procede parallelamente allo sviluppo della spora. Durante la fase di sporulazione, insieme alla spora viene prodotta una formazione cristallina detta corpo parasporale. Mentre la spora rappresenta una forma di resistenza del batterio che, in condizioni idonee, germinerà dando origine a nuove cellule vegetative, il cristallo costituisce la principale componente dotata di attività insetticida. La produzione della spora richiede energia ottenuta tramite fosforilazione ossidativa, per cui la disponibilità di ossigeno diventa un fattore limitante, e questo spiega perché nel cadavere degli insetti la sporulazione risulti generalmente scarsa.



Ciclo di sviluppo di *Bacillus thuringiensis*.

Tabella 2 – Principali batteri comunemente impiegati in agricoltura come bioinsetticidi e target principali. Questi microrganismi agiscono in modo mirato contro insetti nocivi e, in alcuni casi, anche contro nematodi e acari. Sono strumenti utili per una difesa biologica a basso impatto ambientale. I batteri entomopatogeni mostrano una spiccata selettività verso precisi gruppi d'insetti: *Bacillus thuringiensis israelensis* e *Lysinibacillus sphaericus* sono mirati al controllo delle zanzare; le sottospecie *aizawai* e *kurstaki* di *B. thuringiensis*, insieme a *Burkholderia rinojensis* e *Chromobacterium subtsugae*, agiscono principalmente contro i lepidotteri; mentre *B. thuringiensis tenebrionis*, *B. thuringiensis galleriae* e *Paenibacillus popilliae* risultano efficaci sui coleotteri, in particolare sugli scarabeidi del suolo. I fitomizi, invece, sono sensibili ai metaboliti insetticidi prodotti da *Chromobacterium* e dai batteri produttori di spinosine, e gli acari trovano bersaglio nelle avermectine prodotte da *Streptomyces*.

| Entità batteriche | Target principali |
|---|--|
| <i>Bacillus thuringiensis</i> subsp. <i>aizawai</i> | Lepidotteri: <i>Spodoptera</i> , <i>Plutella</i> , <i>Helicoverpa</i> , <i>Trichoplusia</i> |
| <i>Bacillus thuringiensis</i> subsp. <i>galleriae</i> | Soprattutto Coleotteri scarabeidi: <i>Popillia</i> , <i>Rhizotrogus</i> , <i>Phyllophaga</i> , <i>Anomala</i> |
| <i>Bacillus thuringiensis</i> subsp. <i>israelensis</i> | Ditteri acquatici (larve di zanzare e moscerini): <i>Aedes</i> , <i>Culex</i> , <i>Anopheles</i> , <i>Simulium</i> |
| <i>Bacillus thuringiensis</i> subsp. <i>kurstaki</i> | Lepidotteri defogliatori e fitofagi: <i>Spodoptera</i> , <i>Helicoverpa</i> , <i>Ostrinia</i> , <i>Thaumatopoea</i> , <i>Hyphantria</i> |
| <i>Bacillus thuringiensis</i> subsp. <i>tenebrionis</i> | Coleotteri Chrysomelidae: <i>Leptinotarsa</i> , <i>Diabrotica</i> , <i>Altica</i> , <i>Galerucella</i> |
| <i>Burkholderia rinojensis</i> | Polifago: coleotteri e lepidotteri: <i>Spodoptera</i> , <i>Leptinotarsa</i> , <i>Diabrotica</i> , <i>Helicoverpa</i> |
| <i>Brevibacillus laterosporus</i> | Ampio spettro su insetti e acari: <i>Aedes</i> (larve), <i>Culex</i> , <i>Spodoptera</i> , <i>Tribolium</i> |
| <i>Chromobacterium subtsugae</i> | <i>Helicoverpa</i> , <i>Spodoptera</i> , <i>Diabrotica</i> , <i>Leptinotarsa</i> , <i>Aphis</i> |
| <i>Lysinibacillus sphaericus</i> | Altamente specifico sulle zanzare: <i>Culex</i> , <i>Anopheles</i> , <i>Aedes</i> |
| <i>Paenibacillus popilliae</i> | <i>Popillia</i> (larve del maggiolino giapponese) |
| <i>Serratia entomophila</i> | Mirato ai coleotteri del suolo: <i>Costelytra</i> |
| <i>Streptomyces avermitilis</i> * | Azione via metaboliti, non infezione diretta: <i>Tetranychus</i> (acari), <i>Helicoverpa</i> , <i>Plutella</i> , <i>Spodoptera</i> |
| <i>Saccharopolyspora spinosa</i> * | Azione via metaboliti, non infezione diretta: <i>Drosophila</i> , <i>Spodoptera</i> , <i>Helicoverpa</i> , <i>Trialeurodes</i> , <i>Bemisia</i> , <i>Frankliniella</i> |

* Attinomyceti.

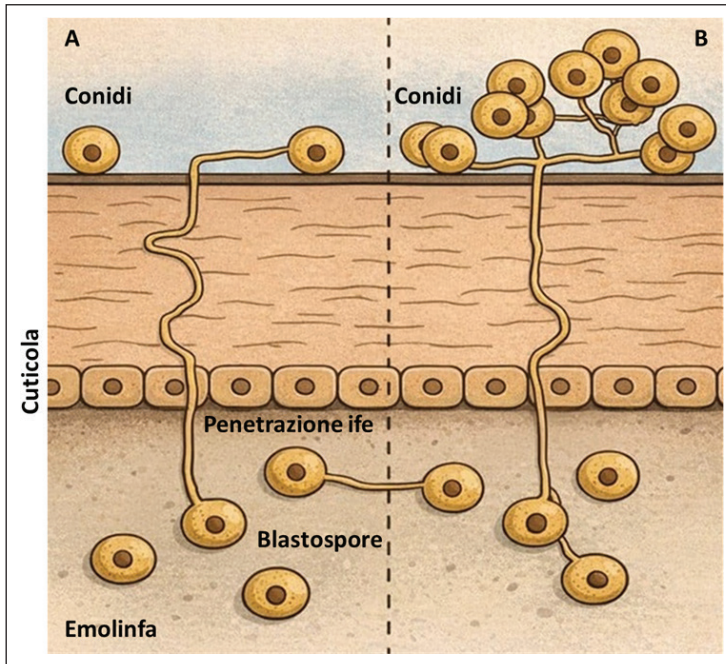


Figura 4 – Ciclo di infezione di *Beauveria bassiana* negli insetti A) Il conidio aderisce alla superficie dell'insetto e germina formando un tubo germinativo. Il fungo penetra la cuticola grazie alla pressione meccanica e alla secrezione di enzimi litici. Una volta raggiunto l'emocelo, cresce sotto forma di blastospore, si nutre dei componenti dell'emolinfa e produce tossine che contribuiscono alla morte dell'ospite, superando le difese immunitarie. B) Dopo la morte dell'insetto, il fungo ri-emerge attraverso la cuticola e sporula sul cadavere, rilasciando nuovi conidi nell'ambiente. aggiungere (Mod. da Valero-Jiménez et al., 2016, *Journal of Invertebrate Pathology*, 133, 41-49).

degli insetti inizia con la penetrazione attiva del nematode all'interno del corpo dell'ospite, per lo più attraverso le aperture naturali, e una volta raggiunto l'emocelo il nematode rilascia i batteri simbiotici che risiedono nel proprio intestino. Questi ultimi trovano nell'emolinfa e nei tessuti dell'ospite, terreno fertile per la propria proliferazione che, grazie ai metaboliti e alle condizioni ambientali, favorirà il successivo sviluppo dei nematodi. Questi ultimi, terminato il ciclo, potranno abbandonare l'ospite sotto forma di stadio infettivo che libero nel terreno andrà alla ricerca di un nuovo ospite.

Diverse specie nei generi *Steinernema* e *Heterorhabditis* sono commercializzate come agenti di controllo biologico. Importante osservare che, a differenza di virus, batteri e funghi entomopatogeni che costituiscono la sostanza attiva di prodotti fitosanitari, i nematodi entomopatogeni non ricadono all'interno della relativa normativa per cui in Europa e in diverse parti del mondo i loro

| Tabella 3 – Principali funghi entomopatogeni e relativi gruppi di insetti bersaglio. | |
|---|---|
| <i>Beauveria bassiana</i> | <i>Sitophilus, Tribolium, Hypothenemus, Cosmopolites, Diabrotica, Bemisia, Trialeurodes, Aphis, Myzus, Spodoptera, Ostrinia, Helicoverpa, Plutella Anastrepha, Ceratitis, Bactrocera, Lutzomyia, Reticulitermes</i> |
| <i>Beauveria brongnartii</i> | <i>Melolontha, Amphimallon, Phyllopertha, Anomala</i> |
| <i>Isaria fumosorosea</i> (Attualmente classificato come <i>Cordyceps fumosorosea</i>) | <i>Bemisia, Trialeurodes, Planococcus, Aphis Frankliniella, Thrips Euscelidius, Empoasca Tuta, Phyllocnistis</i> |
| <i>Lagenidium giganteum</i> | <i>Culex, Aedes, Anopheles</i> |
| <i>Lecanicillium lecani</i> | <i>Aphis, Myzus, Bemisia, TrialeurodesCoccus, Saissetia, Planococcus, Thrips</i> |
| <i>Lecanicillium muscarium</i> | <i>Trialeurodes, Bemisia Aphis, Myzus, Planococcus</i> |
| <i>Metarhizium anisopliae</i> | <i>Popillia, Diabrotica, Phyllopertha, Oryctes, Locusta, Schistocerca, Stomoxys, Musca, Macrotermes</i> |
| <i>Muscador albus</i> | <i>Plodia, Ephestia, Tribolium, Sitophilus, Ceratitis, Drosophila</i> |
| <i>Myrothecium verrucaria</i> | <i>Diabrotica, Leptinotarsa Spodoptera, Helicoverpa</i> |

| Tabella 4 – Nematodi impiegati nel controllo biologico di organismi fitofagi di interesse agrario. | |
|---|---------------------------------|
| <i>Heterorhabditis bacteriophora</i> | Ampia gamma di insetti target |
| <i>Steinernema feltiae</i> | Ampia gamma di insetti target |
| <i>Steinernema carpocapsae</i> | Ampia gamma di insetti target |
| <i>Phasmarhabditis hermaphrodita</i> | Attivo contro Lumache e Limacee |

prodotti non sono soggetti al rigoroso e dispendioso iter di autorizzazione. Il loro uso è dunque assimilabile a quello degli antagonisti naturali basati sugli agenti di controllo biologico come i predatori e i parassitoidi. Nel presente volume sono raccolti i contributi di esperti su batteri, funghi, virus e nematodi patogeni degli invertebrati (insetti e nematodi fitoparassiti in particolare). I vari temi sono presentati sia rispetto al presente stato dell'arte delle conoscenze che alle prospettive future derivanti dalle attività di ricerca e sviluppo in corso, enfatizzando il ruolo che gli entomopatogeni hanno e avranno come strumento nei programmi di gestione integrata e sostenibile delle coltivazioni agrarie.

Controllo microbico: aspetti normativi e di sicurezza

Dal punto di vista normativo i biopesticidi non sono ad oggi un gruppo ben definito a livello di sostanze e prodotti fitosanitari nella legislazione della Unione Europea (vedi capitolo 7). Per anni, questi i microrganismi, e/o gli agenti microbici di contenimento, sono stati valutati con criteri pensati per le sostanze chimiche, creando ritardi e difficoltà nella loro approvazione. Per superare questi limiti, l'UE ha aggiornato profondamente il quadro normativo nel 2022, introducendo regole più specifiche per i microrganismi e cercando di rendere più rapido e chiaro il processo autorizzativo. Il nuovo approccio punta a considerare le caratteristiche biologiche di questi organismi, utilizzando strumenti avanzati come il sequenziamento dell'intero genoma per valutarne la sicurezza e ridurre la necessità di studi sugli animali. Un aspetto fondamentale nella valutazione del rischio del rilascio di questi organismi è certamente il concetto di formulazione del problema, un metodo che permette di valutare il rischio caso per caso e in modo più mirato. In questo contesto è importante anche il ruolo dell'EFSA (Autorità Europea per la Sicurezza Alimentare), che utilizza il sistema QPS per semplificare la valutazione di microrganismi considerati sicuri, e discute le possibilità di applicare il biocontrollo lungo tutta la filiera agroalimentare e non solo in campo. In questo contesto vengono anche evidenziati alcuni effetti positivi ambientali, come la capacità di certi microrganismi di degradare pesticidi sintetici. Nel 2025, il database europeo dei pesticidi riportava 120 sostanze attive microbiche a livello di ceppo, di cui 73 approvate per l'uso, tra queste 24 hanno attività pesticida, e 25 in attesa di approvazione. Tuttavia vi è ancora la necessità di una maggiore armonizzazione normativa, più formazione per gli operatori e ulteriori sviluppi scientifici per sfruttare appieno il potenziale dei biopesticidi nella transizione verso sistemi agricoli più sostenibili.

a cura di
Vincenzo Michele Sellitto, Luca Ruiu, Eustachio Tarasco


edagricole

Controllo microbico dei fitofagi in agricoltura

Difesa delle colture



Per informazioni

Scopri i libri
del catalogo
Edagricole

Acquista

Contattaci

Servizio clienti libri:
libri.edagricole@tecnichenuove.com
Tel. 051.6575833