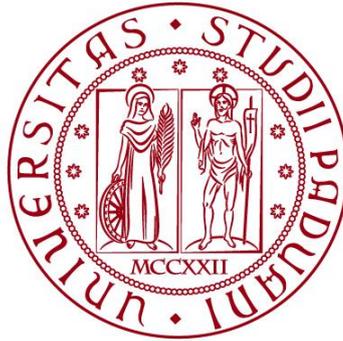


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI BIOLOGIA

Corso di Laurea in Biologia



ELABORATO DI LAUREA

**Parassitosi da *Ips typographus*: dinamiche
ecologiche dell'interazione Parassita-
Ospite**

***Tutor:* Prof.ssa Isabella Moro
Dipartimento di Biologia**

***Laureanda:* Sara Pradella
Matricola: 2043629**

ANNO ACCADEMICO 2023/2024

ABSTRACT

L'infestazione da parte dell'insetto scoltide *Ips typographus* rappresenta una forte minaccia per le foreste di conifere dell'Eurasia, in particolare per le popolazioni di abete rosso (*Picea abies*). Nel presente lavoro viene analizzato il fenomeno delle epidemie di massa, con le cause che ne determinano l'insurrezione e le relative conseguenze.

Nello specifico, in primo luogo vengono presentati i protagonisti dell'interazione: *Ips typographus* e *Picea abies*. Viene esposta la biologia e l'ecologia del parassita, con particolare attenzione al suo ciclo vitale e agli andamenti delle popolazioni, dai quali dipende il manifestarsi delle epidemie. Relativamente all'ospite, invece, vengono illustrati i fattori di stress che ne incrementano la vulnerabilità e le variabili che regolano la capacità di resistenza.

A seguito di questa prima analisi, il lavoro si concentra sulle modalità di instaurazione e mantenimento dell'infestazione. Vengono analizzate le differenti fasi di quest'ultima, gli effetti della sua propagazione sulla salute degli ospiti e le differenti sintomatologie che emergono nell'arco del suo avanzamento. A questo riguardo, il lavoro esamina anche le strategie difensive adottate dalla specie *Picea abies* in risposta agli attacchi.

A seguire, vengono analizzate alcune tra le numerose interazioni biotiche che si originano con l'avanzamento dell'epidemia, con particolare riguardo verso i funghi ofiostomatoidi, in associazione con *Ips typographus*, e verso i nemici naturali di quest'ultimo. A tale proposito, vengono approfonditi gli aspetti relativi alla comunicazione chimica che sostiene e guida tali interazioni.

Successivamente, viene valutata l'influenza dei cambiamenti climatici sull'aumento della propagazione delle epidemie da *Ips typographus*, soffermandosi in particolare sull'incidenza delle tempeste di vento e dell'innalzamento delle temperature.

Infine, vengono spiegate e discusse alcune delle tecniche adottate per l'individuazione e la gestione delle epidemie, evidenziando l'esigenza di riuscire a operare tramite rilevazioni e interventi con la massima tempestività possibile.

INDICE:

INTRODUZIONE	2
I. I PROTAGONISTI DELL'INTERAZIONE NEGATIVA: <i>Ips typographus</i> e <i>Picea abies</i> (L.) H.Karst.	3
1. <i>Ips typographus</i> : aspetti biologici ed ecologici del bostrico della corteccia	3
2. <i>Picea abies</i> : ospite abituale del bostrico	6
II. INSTAURAZIONE E MANTENIMENTO DELL'INFESTAZIONE DA <i>Ips typographus</i>	8
1. Le difese adottate da <i>Picea abies</i> in risposta all'infestazione	12
III. INTERAZIONI BIOTICHE CON <i>Ips typographus</i>	14
1. Interazione funghi e <i>Ips typographus</i> ed effetti della presenza dei funghi sull'andamento dell'infestazione	15
2. I nemici naturali di <i>Ips typographus</i>	18
IV. LE CONSEGUENZE DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI	20
V. TECNICHE DI GESTIONE DELL'EPIDEMIA DA <i>Ips Typographus</i>	22
BIBLIOGRAFIA	26

INTRODUZIONE

Ips typographus L. (comunemente noto come bostrico della corteccia o bostrico europeo) è un insetto appartenente alla famiglia Curculionidae, sottofamiglia Scolytinae, parassita forestale altamente pericoloso, diffuso principalmente nelle foreste del Nord America ed Europa (Hyblerová *et al.*, 2021; Netherer *et al.*, 2021; Kautz *et al.*, 2024). Dal punto di vista ecologico, questo scolitide presenta un ruolo chiave come decompositore degli ecosistemi forestali. In condizioni normali, il bostrico della corteccia tende a colonizzare esemplari indeboliti o deperenti di *Picea abies* (comunemente noto come l'abete rosso norvegese), considerato ospite abituale, anche se sono state rilevate anche infestazioni in esemplari appartenenti ad altri generi (Schebeck *et al.*, 2022). Negli ultimi anni però, i disturbi abiotici innescati dal cambiamento climatico hanno indotto un aumento dei fenomeni di epidemia di massa legate ad *Ips typographus*. I fenomeni meteorologici estremi sempre più frequenti hanno infatti determinato un aumento del numero di alberi indeboliti, che ha portato ad una crescita delle popolazioni di questa specie di scolitide. In tali condizioni, la diffusione del parassita ha iniziato a non limitarsi più unicamente agli alberi stressati, allargandosi anche verso esemplari in salute (Hysek *et al.*, 2021; Schebeck *et al.*, 2022;).

Il danno all'ospite provocato dall'infestazione consiste nell'interruzione del flusso floematico, ovvero del flusso di linfa elaborata che scorre dagli organi fotosintetici alle aree periferiche della pianta, causata dalla creazione di gallerie materne all'interno delle quali avviene la deposizione delle uova e il loro sviluppo in larve, pupe ed esemplari giovanili. L'intensità dell'infestazione dipende strettamente dal numero e dalla lunghezza delle gallerie, caratteristiche che determinano anche la numerosità della covata e la densità della successiva alimentazione della prole in sviluppo, la quale fa riferimento al materiale floematico (Kautz *et al.*, 2024).

I. I PROTAGONISTI DELL'INTERAZIONE NEGATIVA: *Ips typographus* e *Picea abies* (L.) H.Karst.

Per una corretta analisi e conoscenza del fenomeno rappresentato dall'interazione negativa tra *Ips typographus* e *Picea abies*, è opportuno avere una prima visione chiara della biologia e dell'ecologia dei due protagonisti.

1. *Ips typographus*: aspetti biologici ed ecologici del bostrico della corteccia

L'*Ips typographus* rappresenta una specie monofaga appartenente al gruppo degli scolitidi della corteccia, un insieme di insetti parassiti che causano notevoli danni alle foreste di conifere. In particolare, *Ips typographus* è classificato all'interno dell'ordine Coleoptera, famiglia Curculionidae, sottofamiglia Scolytinae ed è dannoso in prevalenza per le foreste di *Picea abies*. Come però già anticipato nell'introduzione, sono stati rilevati anche casi di infestazioni da *Ips typographus* in esemplari appartenenti ad altri generi di conifere quali *Pinus*, *Larix*, *Abies* e *Pseudotsuga* (Hyblerová *et al.*, 2021; Schebeck *et al.*, 2022).

Ips typographus presenta un rilevante ruolo ecologico ed economico nelle foreste di conifere dell'Eurasia (Biedermann *et al.*, 2019). Quando presente in popolazioni di numerosità ridotta e controllata, agisce da parassita secondario come importante decompositore ecologico eliminando esemplari ospiti già presenti in condizioni critiche e morenti (Schebeck *et al.*, 2022; Blake *et al.*, 2024). In tal modo, con la sua attività garantisce il corretto recupero dei nutrienti nell'ecosistema. In seguito però a repentine crescite dei livelli di popolazione, causate da eventi meteorologici estremi, quali periodi prolungati di siccità, forti venti e incrementi delle temperature, l'attività di *Ips typographus* degenera in epidemie di massa che danneggiano pericolosamente le foreste di *Picea abies* (Sousa *et al.*, 2023). Gli stress abiotici, infatti, incrementano la quantità di ospiti danneggiati e disponibili all'attacco del bostrico. Tale meccanismo porta ad una crescita della popolazione del parassita che allarga l'attacco anche a esemplari di *P. abies* in salute (Hysek *et al.*, 2021; Blake *et al.*, 2024).

Analizzando la biologia di *Ips typographus* è senza dubbio necessario soffermarsi sul ciclo vitale del parassita, in quanto i ritmi biologici dell'organismo regolano quelli relativi all'instaurazione e al mantenimento, con successo, dell'infestazione.

Il ciclo vitale di *Ips typographus* è regolato dal fotoperiodo e dalla temperatura. A seconda della localizzazione geografica, *Ips typographus* può presentare un ciclo riproduttivo univoltino o multivoltino. Nello specifico, nelle regioni europee settentrionali il bostrico si riproduce in una sola generazione, mentre nelle regioni centrali e occidentali in due o più generazioni (Gilles *et al.*, 2024).

L'inizio della parassitosi ha luogo attraverso l'attività degli esemplari maschili. Questi ultimi sono guidati da segnali olfattivi, visivi e del gusto, grazie ai quali discriminano e selezionano gli ospiti più opportuni (Netherer *et al.*, 2021). L'attacco avviene mediante perforazione e attraversamento della corteccia dell'ospite. A seguito di questa prima interazione, l'esemplare di *P. abies* infettato attiva risposte difensive attraverso la produzione di composti organici volatili biogenici (VOCs). I principali tra questi sono le oleoresine, le quali presentano una tossicità elevata e una possibilità di intrappolamento fisico nei confronti dei parassiti. Sono quindi efficacemente utilizzate per l'eliminazione e la repulsione di questi ultimi (Jaakkola *et al.*, 2023; Kandasamy *et al.*, 2023). Interessante sottolineare come il possibile successo della resina e dei relativi VOCs a un primo ciclo di infestazione si riduce notevolmente con la successione di più infestazioni coesistenti (Gilles *et al.*, 2024).

La resistenza e il superamento delle prime difese attivate dall'ospite da parte degli esemplari di *Ips typographus* rappresentano una criticità nell'instaurazione dell'infestazione (Biedermann *et al.*, 2019). Se tale criticità viene vinta dal parassita, l'infestazione prosegue nella sua propagazione. In particolare, gli esemplari maschili avanzano tramite la formazione di camere d'accoppiamento all'interno dei tessuti dell'ospite, nelle quali si accoppiano secondo poliginia con diverse femmine conspecifiche (solitamente un massimo di quattro). Il richiamo di altri individui ai fini dell'accoppiamento

è mediato dalla produzione di feromoni di aggregazione, cis-verbenolo e 2-metil-3-buten-2-olo. Questi due composti sono prodotti dai maschi precursori, nello specifico il primo di questi risulta dall'ossidazione dell' α -pinene dell'ospite (Kandasamy *et al.*, 2023).

Completato l'accoppiamento, le femmine di *Ips typographus* intraprendono la costruzione di gallerie materne verticali, all'interno delle quali depongono le loro uova secondo piccole nicchie. Tali tunnel seguono il percorso delle fibre floematiche e ospitano lo sviluppo delle larve in pupe ed esemplari giovanili. Durante la maturazione dei giovani, che dipende dall'approvvigionamento di risorse a partire dal materiale floematico, e che quindi ostacola il circolo di sostanze nutritive all'interno della pianta, gli scolitidi adulti possono o meno abbandonare il primo ospite per dare origine a un nuovo ciclo riproduttivo. In quest'ultimo caso, risulta la generazione di una covata sorella (Schebeck *et al.*, 2022).

Per quanto riguarda la capacità del coleottero di percepire segnalazioni sensoriale, è stato osservato che gli esemplari di *Ips typographus* presentano specifiche cellule sensoriali attraverso le quali percepiscono segnali che possono essere positivi e attrattivi o negativi e anti-attrattivi. Rispettivamente, i primi consistono nei feromoni di aggregazione prodotti dai conspecifici pionieri, nei monoterpeni idrocarburici emessi dall'ospite e nelle molecole volatili prodotte dagli organismi microbici che prendono parte all'instaurazione dell'infestazione. Viceversa, le segnalazioni negative coincidono con la produzione di sostanze da piante non-ospiti e con feromoni di aggregazione prodotti da organismi di diversa specie.

Soffermandosi nel dettaglio della percezione olfattiva di *Ips typographus*, questa è consentita dalla presenza di cellule sensoriali ricche di neuroni sensoriali olfattivi (OSN), disposte lungo le loro caratteristiche antenne, in posizione ventrale. Tramite una percezione che può essere generalista o specialista, a seconda della quantità di molecole discriminate dai sensilli olfattivi, i coleotteri della corteccia riescono a orientarsi sia su piccola che su larga scala, garantendo un'elevata efficienza nell'attacco degli ospiti (Netherer *et al.*, 2021).

Oltre al ciclo vitale di *Ips typographus* e ai meccanismi che lo regolano, è importante comprendere i modelli di andamento delle popolazioni dello scolitide della corteccia durante le differenti fasi dell'epidemia.

L'andamento di popolazione di *Ips typographus* può essere definito in quattro differenti fasi. La prima fase, non epidemica, presenta un basso numero di individui che attaccano esemplari ospiti non in salute. La seconda fase è la fase di accumulo, durante la quale la numerosità degli individui nella popolazione si incrementa rapidamente. Ciò è determinato da una diminuzione della competizione intraspecifica, provocata dalla presenza di eventi abiotici improvvisi e dannosi che aumentano la quantità di risorse accessibili al parassita. La terza fase coincide con l'esplosione dell'epidemia: la popolazione di *Ips typographus* è abbondante e gli esemplari infettano anche esemplari ospiti in salute. Durante questa fase si verifica però anche una graduale diminuzione della numerosità della popolazione, determinata dall'elevata competizione intraspecifica indotta dagli attacchi di massa. L'ultima fase, definita fase di collasso, conduce alla cessazione dell'epidemia per diminuzione netta della popolazione di scolitidi. Le cause che conducono a quest'ultima non sono ancora note con precisione. Vi sono delle ipotesi a riguardo, tra le quali il raggiungimento di una maggiore efficienza difensiva da parte dell'ospite, l'instaurazione di nuove interazioni nella comunità microbica che danneggiano il parassita, la comparsa di variazioni a livello genotipico o fenotipico a seguito delle epidemie di massa (Biedermann *et al.*, 2019).

2. *Picea abies*: ospite abituale del bostrico

Picea abies (L.) H.Karst. è l'ospite principale di *Ips typographus* (Hyblerová *et al.*, 2021). La specie appartiene alla classe Pinopsida e alla famiglia Pinaceae, ed è diffusa negli ambienti di montagna tipicamente boreali o nemorali, caratterizzati quindi da un clima fresco e umido. Negli ultimi anni ha acquisito una notevole importanza economica per la qualità del legno di cui dispone. Per tale ragione, la specie è stata introdotta anche in siti non corrispondenti al suo normale areale (Netherer *et al.*, 2024). Tale condizione ha incrementato la pericolosità data dall'infestazione da *Ips typographus*,

perché ha portato allo sviluppo di foreste omogenee più facilmente attaccabili dal parassita (Gilles *et al.*, 2024).

Nell'analizzare l'ospite di *Ips typographus* risulta interessante e necessario comprendere le caratteristiche degli esemplari tipicamente afflitti dall'infestazione. I fattori che determinano il successo del parassita sono molteplici, ma possono essere correlati tutti a una condizione di stress dell'ospite che lo rende meno adatto a fronteggiare efficacemente lo scolitide. Tale stress può essere ricondotto a carenza idrica, condizione sempre più frequente negli ultimi anni a causa dei cambiamenti climatici (Korolyova *et al.*, 2022). Normalmente, gli esemplari di *Picea abies* sono in grado di rispondere a condizioni di carenza idrica attraverso differenti meccanismi, quali la modifica della struttura dell'apparato radicale a fittone e il blocco dell'apertura stomatica (Gilles *et al.*, 2024; Netherer *et al.*, 2024). Tali sistemi portano allo stoccaggio di carboidrati non strutturali, utilizzati per la sintesi di metaboliti secondari di difesa, e alla preservazione delle risorse idriche per le funzioni essenziali della pianta (Korolyova *et al.*, 2022; Netherer *et al.*, 2024;). Periodi di siccità prolungata però danneggiano duramente la pianta, alterando i processi fisiologici che ne regolano le difese, facilitando pertanto il successo della diffusione dell'infestazione (Korolyova *et al.*, 2022).

La capacità di un esemplare di *Picea abies* di fronteggiare un attacco da *Ips typographus* dipende da più variabili (Korolyova *et al.*, 2022):

- **Clima:** come già precedentemente esposto, un ambiente secco e povero d'acqua rappresenta una fonte di stress per la pianta, che difende attraverso la chiusura degli stomi. Tale meccanismo però riduce il processo fotosintetico e determina una diminuzione delle risorse utilizzabili per la sintesi dei metaboliti di difesa;
- **Densità di popolazione:** tale variabile correla strettamente con la precedente. Nelle foreste di *Picea abies* particolarmente ricche di esemplari, la richiesta idrica è particolarmente ingente a causa dell'elevata competizione. Tale condizione, se associata a carenza

d'acqua, determina un ulteriore aumento dello stress idrico nella pianta;

- **Struttura della pianta:** per tale variabile sono da considerare sia le dimensioni della pianta che la copertura della sua chioma. In generale, gli esemplari di *Picea abies* caratterizzati da altezze non eccessive e chiome di maggiori dimensioni hanno maggiore capacità di risposta agli attacchi da *Ips typographus*. Di fatto, a elevate altezze corrispondono maggiori quantità di carbonio ma, di contro, anche maggiori esigenze metaboliche, pertanto la sintesi di metaboliti di difesa viene meno; in parallelo, chiome ridotte non consentono di mantenere un bilancio di carbonio soddisfacente, a causa della ridotta superficie fogliare.

Introdotti i due protagonisti dell'interazione negativa qui analizzata e comprese le principali caratteristiche che li conducono all'instaurazione di quest'ultima, saranno ora approfondite l'infestazione, le fasi che portano alla sua realizzazione, le conseguenze a livello dell'ospite e i processi attivati a catena ai quali prendono parte anche organismi esterni.

II. INSTAURAZIONE E MANTENIMENTO DELL'INFESTAZIONE DA *Ips typographus*

Il fenomeno dell'infestazione da *Ips typographus* nelle foreste di *Picea abies* rappresenta un'interazione negativa a scapito dell'abete rosso. Come già spiegato nei paragrafi precedenti, tale fenomeno si è accentuato negli ultimi anni a causa degli eventi meteorologici e climatici dovuti al riscaldamento globale. Le epidemie di massa rappresentano un estremo biologico e si sono scatenate a seguito del raggiungimento di condizioni ambientali al limite, sempre più frequenti (Takov *et al.*, 2021).

L'instaurazione dell'interazione negativa si verifica a causa della dipendenza del parassita dalla pianta ospite. Infatti, per il completamento del suo ciclo vitale *Ips typographus* necessita di deporre le sue uova nel sistema floematico della pianta. All'interno di quest'ultimo avviene lo sviluppo delle larve in

individui giovanili, che usano la linfa elaborata per ottenere le risorse nutritive di cui necessitano. Di contro, l'ospite subisce un notevole danno: l'ovodeposizione da parte di *Ips typographus* prevede la costruzione di gallerie materne all'interno dei vasi floematici che ostacolano il flusso linfatico nei condotti (Korolyova *et al.*, 2022). Lo svantaggio procurato a *Picea abies* è inoltre ulteriormente amplificato dall'insieme di funghi e microorganismi immessi nella pianta dallo scolitide, durante l'attacco (Hysek *et al.*, 2021). Si instaura infatti una rete di interazioni all'interno dell'ospite che alimenta la pericolosità e l'efficacia dell'infestazione.

L'infestazione da *Ips typographus* può essere descritta in tre fasi (Kautz *et al.*, 2024):

- **prima fase:** consiste nella diffusione del parassita all'interno del sistema floematico della pianta. Ha inizio con la penetrazione degli esemplari maschili nei vasi floematici, dove creano camere d'accoppiamento, attraverso appositi fori d'ingresso (Fig. 1a), e termina con la costruzione delle gallerie materne ad opera delle femmine. La fase dura indicativamente 14 giorni dopo il primo attacco. La densità dell'invasione dipende dalla densità degli attacchi che colpiscono il medesimo ospite, invece la numerosità di gallerie materne costruite dipende dal numero di femmine con cui si accoppiano i singoli maschi.

Durante questa prima fase, l'abete colpito dal parassita non sviluppa inizialmente importanti alterazioni del suo funzionamento e del suo stato di salute. I processi fotosintetici e i flussi di linfa all'interno dei sistemi floematici e xilematici non sono infatti eccessivamente danneggiati. Ciononostante, *Picea abies* a questo stadio dell'infestazione attiva già dei meccanismi di difesa;

- **seconda fase:** consiste nel proseguimento della costruzione delle gallerie materne e nell'ovodeposizione al loro interno. Inoltre, ha inizio lo sviluppo delle larve in pupe e individui giovanili. Durante questo stadio si può verificare anche l'abbandono dell'ospite da parte

degli individui adulti, allo scopo di ripetere il medesimo procedimento d'invasione in un secondo esemplare di *Picea abies* e di generare una o più covate sorelle.

I danni provocati dall'infestazione a questo punto iniziano a essere più considerevoli. L'aumento dell'estensione delle gallerie di covata e del numero di larve in sviluppo determinano un sempre maggiore impedimento del corretto flusso di linfa nella pianta. Tale condizione porta alla diminuzione dei tassi fotosintetici e di sintesi di composti di difesa e di conseguenza ad una conseguente condizione di forte stress nell'ospite (Kautz *et al.*, 2024).

La durata di questa fase dipende dalla temperatura. Normalmente è di 6-12 settimane, ma l'andamento delle temperature lascia immaginare che nei prossimi anni tali tempistiche si ridurranno, incrementando la velocità di sviluppo del parassita e dell'infestazione (Kautz *et al.*, 2022);

- **terza fase:** ha inizio quando gli individui giovanili cominciano a emergere dalla pianta, tramite la formazione di appositi fori d'uscita (Fig. 1b). A questo stadio dell'infestazione l'ospite inizia il processo di decadimento, attraverso lo scolorimento della chioma fogliare, la perdita di foglie e il distacco della corteccia dal fusto.

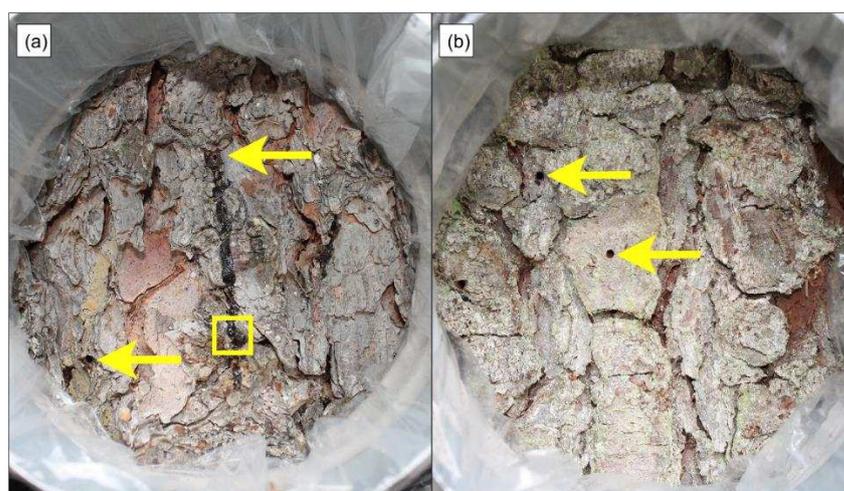


Figura 1. Nell'immagine sono indicati i fori d'ingresso (a) e d'uscita (b) degli scolitidi. All'interno del riquadro segnalato è incorniciato un esemplare di *Ips typographus* (Jaakkola *et al.*, 2023).

A seconda dei diversi stadi dell'infestazione possono essere individuate differenti sintomatologie, utilizzate come indici per l'individuazione della parassitosi e per il suo controllo. I sintomi più precoci appaiono a partire già dalla prima fase dell'infestazione e corrispondono ai fori di ingresso degli scolitidi, presenti a livello della corteccia dell'ospite, al distacco lento di quest'ultima e alla secrezione di resina e rosime da parte della pianta, come primo meccanismo di difesa (Fig. 2). Al contrario, nelle fasi più avanzate possono essere individuati i sintomi più tardivi, che coincidono con gli effetti del processo di decadimento attivato dalla pianta al terzo stadio dell'infestazione (Fig. 2) (Kautz *et al.*, 2022). In particolare, questo processo di deperimento dell'esemplare di *Picea abies* può essere descritto in tre fasi, denominate rispettivamente fase verde, fase rossa e fase grigia.

Durante la fase verde l'abete rosso mantiene la caratteristica colorazione dei suoi aghi, in quanto l'infestazione è ancora allo stadio iniziale del suo sviluppo.

A partire dalla fase rossa invece, il colore degli aghi inizia a cambiare divenendo rosso e bruno, in quanto la pianta inizia a percepire maggiormente lo stress causato dal parassita.

L'ultima fase, quella grigia, coincide con la totale perdita delle foglie e della corteccia, che conduce all'esaurimento della chioma e all'alterazione della colorazione del tronco, che diviene per l'appunto grigio (Gilles *et al.*, 2024). La comparsa e la rilevabilità dei sintomi nelle piante colpite dall'infestazione rappresentano delle importanti variabili nelle tecniche di controllo dell'epidemia, basate sull'indagine terrestre e sul telerilevamento (Kautz *et al.*, 2024).

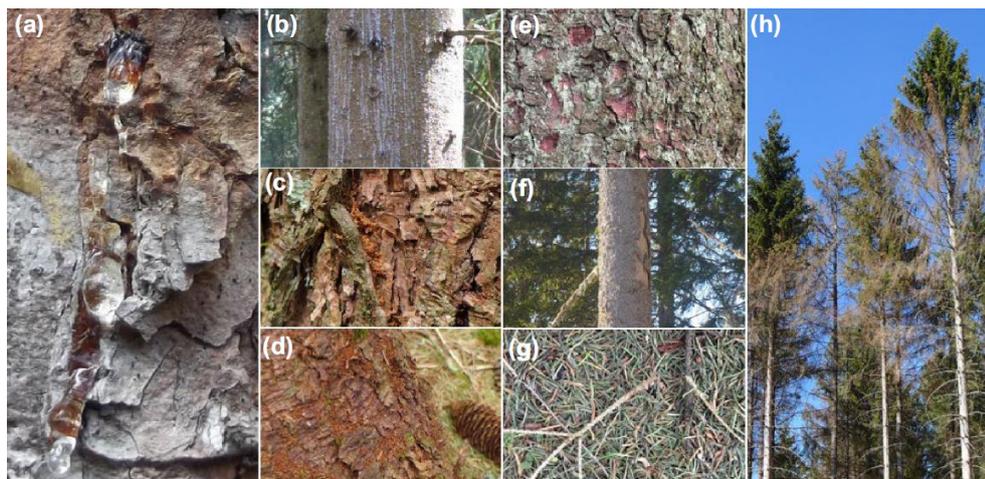


Figura 2. Sono riportati nell'immagine esempi delle sintomatologie dell'infestazione: flusso di resina (**a, b**); rosime (**c, d**); ridotta perdita di corteccia (**e**); perdita di corteccia più estesa (**f**); defogliazione di aghi verdi (**g**); scolorimento della chioma (**h**). Mentre i primi tre sintomi riflettono le prime fasi dell'infestazione, gli ultimi tre sono relativi agli stadi più avanzati (Kautz *et al.*, 2022).

1. Le difese adottate da *Picea abies* in risposta all'infestazione

Gli esemplari di *Picea abies* hanno evoluto strategie per rispondere alle infestazioni da *Ips typographus*, le quali consistono nella sintesi di composti di difesa. La tipologia di tali composti e la relativa concentrazione dipendono dal genotipo della pianta, dal tessuto dal quale vengono prodotti e dall'intensità dello stress biotico e abiotico presenti. La sintesi è preformata e viene incrementata al momento dell'attacco da parte di un patogeno o parassita esterno. È stato ad esempio documentato che l'aumento delle concentrazioni di terpeni nell'ospite consentono un controllo o addirittura un impedimento dell'insorgenza di un attacco da *Ips typographus* (Netherer *et al.*, 2021). In condizioni di siccità moderata la risposta della pianta è rapida; al contrario, in condizioni di forte stress idrico l'efficacia di sintesi si riduce. Le risorse di carboidrati e acqua, infatti, sono limitate e non consentono di attivare valide resistenze all'infestazione (Netherer *et al.*, 2021; Netherer *et al.*, 2024).

Il principale composto di difesa in *Picea abies* è rappresentato dalle resine, ricche di terpeni e di composti organici volatili biogenici (BVOCs) al loro interno (Kandasamy *et al.*, 2023). In generale, i BVOCs sono composti volatili secreti costitutivamente dalla pianta, principalmente a livello del

tronco e della corteccia, o stoccati in appositi tessuti di riserva. Al verificarsi di un attacco da *Ips typographus*, tali composti respingono e uccidono il parassita: avvolgendo gli individui adulti e diffondendosi nelle gallerie materne ricche di uova, raggiungendo così l'intera popolazione. La loro pericolosità nei confronti del parassita è stabilita dalla tossicità da contatto, dall'impedimento alla nutrizione e dall'imprigionamento fisico (Netherer *et al.*, 2024). Le medesime resine inoltre, una volta emesse all'esterno della pianta, solidificano lasciando volatilizzare i BVOCs in esse contenuti. Tale meccanismo consente la chiusura dei fori provocati dall'attacco del bostrico (Jaakkola *et al.*, 2023).

Nella difesa da *Ips typographus* sono anche importanti e determinanti i composti fenolici. Questi ultimi vengono prodotti e stoccati all'interno di specifiche cellule localizzate nel tessuto floematico o a livello della corteccia della pianta, definite cellule del parenchima polifenolico (PP). Tali composti agiscono come antiossidanti e come fungicidi, ma costituiscono anche un'importante riserva di carbonio per la pianta (Netherer *et al.*, 2024). In particolare, i fenoli vengono accumulati a livello delle zone lesionate dal parassita (Netherer *et al.*, 2021).

Risulta importante comprendere che gli esemplari di *Picea abies* non mantengono costanti i tassi di produzione dei composti di difesa. Le piante, infatti, vengono influenzate dalle condizioni abiotiche alle quali sono sottoposte durante l'invasione da *Ips typographus*. È già stato precedentemente spiegato che in condizioni di estrema siccità le capacità difensive della pianta vengono meno, a causa delle ridotte risorse idriche e carboniose. Pertanto, in carenza di acqua la tolleranza di *Picea abies* all'infestazione si riduce, incrementando la diffusione della stessa (Netherer *et al.*, 2021).

A prescindere dall'influenza delle condizioni abiotiche esterne, è stato osservato che i tassi di produzione subiscono un decadimento esponenziale nel corso del tempo (Jaakkola *et al.*, 2023). Di fatto, il rendimento di sintesi dei composti di difesa è consistente all'inizio dell'infestazione e diminuisce progressivamente nel suo decorso. Le ragioni di questo andamento sono due:

la prima è correlata alla resina e al suo indurimento una volta secreta all'esterno, che porta alla chiusura dei fori d'ingresso e d'uscita dello scolitide, attraverso queste aperture avviene la secrezione degli stessi composti di difesa; la seconda invece considera l'impatto del parassita all'interno della pianta, e la conseguente alterazione dei processi fisiologici e biochimici di quest'ultima. È stato in particolar modo osservato che i tassi di emissione della resina a livello dei fori d'ingresso, formati all'inizio dell'infestazione, risultano superiori rispetto a quelli dei fori d'uscita, che si formano più tardivamente, a conferma del graduale decadimento delle difese della pianta (Jaakkola *et al.*, 2023).

A questo riguardo, è anche interessante osservare la capacità di un esemplare di *Picea abies* di rispondere a un attacco in relazione al suo stato di salute. Nel medesimo studio sono stati confrontati due diversi esemplari di abete rosso sottoposti all'infestazione, il primo in completa salute e il secondo reduce da un attacco, avvenuto durante la stagione precedente (Jaakkola *et al.*, 2023). Ciò che si è osservato è che mentre all'inizio del contagio i tassi di sintesi nel primo esemplare erano inferiori rispetto a quelli del secondo, nel corso dell'epidemia l'albero già precedentemente colpito aveva ridotto i livelli di sintesi, mentre quello in salute li aveva mantenuti elevati. Inoltre, la composizione chimica dei composti di difesa prodotti dalle due piante risultavano differenti. Quest'osservazione, assieme alla prima, consente di capire che la capacità di risposta all'attacco da *Ips typographus* cambia nel tempo, riducendosi, e che la successione di due generazioni di parassita nel medesimo esemplare determinano una sintesi di composti di difesa che può perdurare più a lungo, ma che poi si rivela insufficiente per la sopravvivenza dell'esemplare (Jaakkola *et al.*, 2023).

III. INTERAZIONI BIOTICHE CON *Ips typographus*

L'infestazione da *Ips typographus* in *Picea abies* è un fenomeno che nel suo sviluppo e decorso non si limita esclusivamente ai due principali protagonisti dell'interazione. Il parassita, infatti, al momento dell'attacco introduce all'interno dell'ospite anche altre forme di vita, quali funghi e microrganismi,

fonti di ulteriori ripercussioni sulla pianta (Hysek *et al.*, 2021). Inoltre, attraverso una serie di composti chimici emessi dal parassita, dalla pianta o dai microrganismi in interazione con questi, possono essere attirati anche i nemici naturali di *Ips typographus*. In generale infatti, prendono parte all'infestazione organismi che possono avere un'influenza sul parassita sia positiva che negativa, o neutra (Biedermann *et al.*, 2019).

1. Interazione funghi e *Ips typographus* ed effetti della presenza dei funghi sull'andamento dell'infestazione

Gli organismi di maggior importanza tra quelli che interagiscono con *Ips typographus* e *Picea abies* nel corso dell'infestazione sono rappresentati dai funghi ofiostomatoidi. Si tratta di un gruppo di funghi necrotrofi che instaurano relazioni di ectosimbiosi con gli scolitidi, attraverso mutualismo, commensalismo o antagonismo (Schebeck *et al.*, 2022). Tali funghi sono noti anche come i funghi dalla colorazione blu, in quanto la propagazione longitudinale delle relative ife all'interno del legno di *Picea abies* ne modifica la colorazione, facendolo apparire bluastro (Hysek *et al.*, 2021). Le specie più comuni appartengono prevalentemente alla classe Ascomycota e comprendono principalmente le specie *Endoconidiophora polonica* e *Grosmannia penicillata*. Con minore frequenza si possono trovare anche le specie fungine *Grosmannia europioides*, *Ophiostoma bicolore* e *Ophiostoma ainoae* (Netherer *et al.*, 2024). I funghi sono introdotti all'interno della pianta dallo stesso parassita durante la realizzazione di un attacco, in quanto incapaci di attraversare autonomamente la corteccia. All'interno della pianta poi, inducono la necrosi del sistema floematico attraverso la produzione di specifici metaboliti (Netherer *et al.*, 2021).

Il vantaggio dell'instaurare una simbiosi con i funghi ofiostomatoidi è rappresentato dall'opportunità del parassita di essere agevolato nella diffusione all'interno dell'ospite. Tale meccanismo è legato alla capacità dei funghi simbiotici di esaurire le difese della pianta mediante metabolizzazione dei composti di difesa (Netherer *et al.*, 2021). Inoltre, i funghi assicurano ai parassiti risorse nutritive sufficienti a preservarne la resistenza e

incrementano la velocità di decadimento dell'ospite (Kandasamy *et al.*, 2023).

Nello specifico, la metabolizzazione dei composti di difesa operata dai funghi ofiostomatoidi conduce alla disintossicazione delle oleoresine secrete da *Picea abies*, mediante la conversione dei terpeni in monoterpeni ossigenati. Tale processo è vantaggioso per *Ips typographus* in quanto riduce l'incidenza delle difese della pianta nei suoi confronti. La produzione di tali sostanze, inoltre, provoca una modifica della composizione chimica delle oleoresine, e rappresenta una guida per gli esemplari adulti di *Ips typographus* indicando loro siti di riproduzione e nutrizione favorevoli (Kandasamy *et al.*, 2023).

La tendenza e la capacità dei funghi di convertire i composti di difesa della pianta può essere spiegata attraverso la conoscenza della natura tossica e antifungina degli stessi composti. Infatti, a partire dalla loro trasformazione in monoterpeni ossigenati, tali sostanze prendono parte ai processi metabolici del fungo per divenire, attraverso ulteriori degradazioni, risorse di carbonio (Kandasamy *et al.*, 2023). La capacità di metabolizzare i differenti composti di difesa di *Picea abies* varia in base alla specie fungina in analisi. Risulta interessante sapere infatti che l'insieme delle specie che compongono la comunità fungina in associazione con *Ips typographus* è ridondante e intercambiabile. Tale caratteristica è importante in quanto garantisce che l'assenza di una specie in associazione possa essere colmata con la presenza di un'altra (Netherer *et al.*, 2021).

La presenza di funghi ofiostomatoidi associati al parassita implica anche un più rapido consumo delle risorse carboniose della pianta, indotto dalla rimobilizzazione delle stesse. Ciò determina, negli esemplari di *Picea abies* sotto attacco, una minore capacità di sintesi dei composti di difesa e un maggiore accumulo di lesioni necrotiche e zone ipersensibili (Netherer *et al.*, 2021; Netherer *et al.*, 2024).

Un altro vantaggio è determinato dal fatto che i monoterpeni ossigenati prodotti dai funghi possono funzionare da composti semiochimici, in sinergia con i feromoni di aggregazione e anti-aggregazione utilizzati dal parassita

(Jirosovà *et al.*, 2022). L'accumulo di monoterpeni ossigenati di origine fungina può infatti segnalare la presenza di una popolazione di coleotteri stabilizzata da più tempo, e quindi un sovraffollamento anti-attrattivo (Kandasamy *et al.*, 2023). Nello specifico, i funghi producono 2-metil-3-buten-2-olo come sostanza attrattiva e verbenone come sostanza di repulsione (Netherer *et al.*, 2024). Il verbenone impedisce il richiamo, in un ospite già colonizzato, di esemplari di *Ips typographus* di entrambi i sessi, per limitare il rischio di competizione intraspecifica (Kandasamy *et al.*, 2023). Inoltre, attraverso il controllo del numero di esemplari parassiti occupanti la pianta ospite, i funghi ofiostomatoidi si assicurano anche il non ingresso di altri esemplari fungini, conspecifici o meno, che rappresenterebbero cause di competizione intraspecifica o interspecifica per il fungo stesso (Netherer *et al.*, 2021). La produzione di sostanze anti-attrattive non dipende però solamente dai funghi associati: le differenti tipologie di composti prodotti possono derivare da diverse fonti. Gli stessi esemplari maschi di *Ips typographus*, completato l'accoppiamento, sintetizzano composti che limitano il richiamo dei conspecifici, quali ipsenolo e ipsdienolo. Inoltre, anche l'esemplare ospite è in grado di produrre una sostanza anti-attrattiva: il monoterpene ossigenato 1,8-cineolo, secreto in condizioni di grave infestazione (Kandasamy *et al.*, 2023; Netherer *et al.*, 2021). Questo aspetto dell'associazione tra *Ips typographus* e i funghi ofiostomatoidi consente di valutare la possibilità di un'evoluzione convergente tra le due parti, per lo sviluppo di una comunicazione chimica vantaggiosa per entrambe (Netherer *et al.*, 2021).

Tra le specie di funghi ofiostomatoidi che più comunemente si trovano in associazione con *Ips typographus* nelle piante ospiti vi sono *Endoconidiophora polonica* e *Grosmannia penicillata*. *E. polonica* è un fungo noto per la sua capacità di convertire i composti di difesa dell'ospite, quali terpeni e fenoli, in fonti di carbonio per il suo metabolismo. La sua presenza inoltre incrementa i tassi di sintesi delle stesse sostanze da parte della pianta. Viceversa, *G. penicillata* è in grado di sintetizzare i feromoni di aggregazione riconosciuti dal parassita e, inoltre, presenta una maggiore efficienza di disintossicazione dei metaboliti di difesa dell'ospite rispetto a *E.*

polonica, specialmente se associata a *G. europhioides* (Schebeck *et al.*, 2022).

2. I nemici naturali di *Ips typographus*

Oltre ai funghi ofiostomatoidi associati a *Ips typographus*, all'infestazione e al suo decorso possono partecipare anche altre tipologie di organismi. In particolare, è interessante analizzare il ruolo dei predatori e dei parassiti di *Ips typographus*, anche in un'ottica di controllo e gestione delle epidemie (Sousa *et al.*, 2023). Alcuni di questi organismi possono infatti arrivare a generare epizoozie, livelli di diffusione ed estensione talmente elevati da controllare drasticamente l'andamento delle popolazioni del parassita (Takov *et al.*, 2021). Predatori e parassiti di *Ips typographus* sono normalmente attirati verso le popolazioni del parassita attraverso i medesimi segnali chimici prodotti, durante l'avanzamento dell'infestazione, dalle diverse parti che vi partecipano: i monoterpeni ossigenati e feromoni secreti dallo scolitide, dalla pianta ospite o dai simbionti fungini (Kandasamy *et al.*, 2023; Sousa *et al.*, 2023).

Tra i nemici naturali di *Ips typographus* hanno un ruolo rilevante i funghi entomopatogeni. Questi organismi rappresentano un insieme di microrganismi eterotrofi altamente diversificati tra loro, che parassitano gli insetti utilizzando i loro tessuti come fonte nutritiva. Il fungo entomopatogeno dominante per *Ips typographus* è *Beauveria bassiana*, classificato all'interno del phylum Ascomycota, nell'ordine Hypocreales (Takov *et al.*, 2021). Questo fungo è normalmente presente negli ecosistemi occupati dal parassita e dal relativo ospite. All'aumentare della popolazione dello scolitide, poi, la sua diffusione e numerosità incrementano (Hyblerová *et al.*, 2021). Assieme agli altri funghi dell'ordine Hypocreales, questa specie rappresenta una delle cause di mortalità predominanti per *Ips typographus*. Per tale ragione può essere valutato come agente di controllo e gestione delle epidemie determinate da questo scolitide (Takov *et al.*, 2021).

La propagazione dell'infezione da *Beauveria bassiana* può avvenire sia attraverso la diffusione delle relative spore, per mezzo del vento o per adesione agli esemplari di *Ips typographus* stessi o di *Picea abies*, sia

attraverso il contatto diretto tra uno scolitide in salute e un individuo infettato dal parassita. Il risultato dell'attività di *Beauveria bassiana* sulla dimensione di popolazione di *Ips typographus* è influenzata da diversi fattori, sia biotici che abiotici. Tra questi hanno un ruolo importante temperatura e raggi UV, nonché i composti di difesa secreti da *Picea abies* nel corso dell'infestazione. Inoltre, anche l'intervento di microrganismi in associazione con lo scolitide e l'andamento dell'infestazione dello stesso possono incidere sul rendimento della diffusione di *Beauveria bassiana* (Hyblerová *et al.*, 2021).

Un altro esempio di un nemico naturale molto comune per *Ips typographus* sono le mosche appartenenti al genere *Medetera*, tra i più comuni predatori dello scolitide. Nel corso del loro ciclo vitale, infatti, le femmine di *Medetera* sp. depongono le loro uova all'interno degli esemplari di *Picea abies* già colonizzati dal parassita. In particolare, l'ovodeposizione avviene in prossimità delle gallerie materne costruite da quest'ultimo. Successivamente, dalle uova di *Medetera* sp. si sviluppano le relative larve, che spostandosi all'interno delle gallerie materne proseguono il loro sviluppo nutrendosi delle larve e pupe di *Ips typographus* (Sousa *et al.*, 2023).

Interessante e importante sottolineare che, come già precedentemente anticipato, l'attrazione dei parassiti e predatori di *Ips typographus* dipende dal riconoscimento dei segnali chimici normalmente emessi dai protagonisti dell'epidemia. Proseguendo nell'esempio di *Medetera* sp., è stato documentato che queste mosche sono normalmente indirizzate verso la preda attraverso la rilevazione dei feromoni di aggregazione secreti dallo scolitide. A maggior ragione, è stato osservato che l'aggiunta dei monoterpeni prodotti dall'albero ospite determina un aumento dell'attrazione di *Medetera* sp. Un ulteriore esempio, a conferma dell'importanza della segnalazione chimica nel mantenimento di queste interazioni tritrofiche, è rappresentato da *Thanasimus formicarius*. Si tratta di un altro coleottero predatore di *Ips typographus*, in grado non solo di percepire i feromoni di aggregazione e i composti monoterpenici prodotti dal parassita e dalla pianta ospite, ma di riconoscere anche i composti ossigenati secreti dai microrganismi associati all'infestazione (Sousa *et al.*, 2023). Gli esemplari di *Thanasimus*

formicarius, infatti, presentano specifici neuroni sensoriali olfattivi (OSN) per il riconoscimento di tali segnali chimici (Kandasamy *et al.*, 2023).

Un ultimo esempio di nemico naturale di *Ips typographus* è rappresentato da un gruppo di nematodi parassiti che si stabiliscono all'interno dello scolitide, determinandone raramente la morte immediata, ma causandone una diminuzione dei livelli di fertilità. In generale, i nematodi che interagiscono con gli esemplari di *Ips typographus* non sono tutti antagonisti di questo. Vi sono anche esempi di specie che con il bostrico instaurano mutualismi e foresi. Ciononostante, soprattutto in un'ottica di gestione delle epidemie del bostrico della corteccia, è utile soffermarsi più attentamente sulle specie parassite. Come già anticipato, l'infestazione ha luogo all'interno del corpo dell'ospite: gli esemplari femmina del nematode entrano nelle larve o pupe dell'ospite e si stabilizzano nella loro regione addominale. Mentre le larve dello scolitide proseguono nel loro sviluppo, le femmine di nematode producono, nella cavità addominale dell'ospite, le loro uova. Queste ultime si schiudono una volta completato lo sviluppo dell'individuo giovanile di *Ips typographus*. La generazione di nuova prole da parte delle femmine di nematode si ripete per quattro cicli riproduttivi. Al completamento di questi, gli individui generati si riversano nelle gallerie materne dello scolitide, dove si sviluppano in individui adulti e si riproducono tra loro. Ultimo l'accoppiamento, le femmine fecondate entrano nuovamente all'interno delle larve di *Ips typographus*, e danno inizio a un nuovo ciclo dell'infestazione (Takov *et al.*, 2021).

IV. LE CONSEGUENZE DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI

Gli attuali cambiamenti climatici stanno causando una sempre più frequente comparsa delle epidemie da *Ips typographus*. Queste, infatti, sono alimentate dagli eventi meteorologici e dalle condizioni abiotiche estreme, in quanto tali problematiche incrementano la vulnerabilità degli esemplari di *Picea abies* e la quantità di materiale accessibile dal parassita, facilitando l'attacco da parte di quest'ultimo (Schebeck *et al.*, 2022; Marangon *et al.*, 2024).

In particolare, attualmente le tempeste di vento sono ritenute tra le principali cause delle epidemie. Queste sono considerate, infatti, come le primarie fonti di disturbo abiotico per le foreste europee: negli ultimi anni è stata osservata una media di due tempeste l'anno in Europa, con danni che superano di tre volte quelli causati dagli incendi (Motta *et al.*, 2018; Marangon *et al.*, 2024). Per quanto riguarda le tempeste di vento, risulta interessante fare riferimento alla Tempesta Vaia scatenatasi sulle Alpi orientali italiane nell'ottobre 2018. Tale fenomeno è tuttora riconosciuto come l'evento con le più alte ripercussioni sulle foreste italiane mai rilevato. Si è presentato come unione di violente alluvioni e forti raffiche di vento, che hanno raggiunto il picco di 200 km/h. L'impatto della tempesta è stato eloquente: sono stati danneggiati e distrutti 42.525 ettari di boschi di pini, abeti e faggi (Chirici *et al.*, 2019).

Nel trattare le tempeste di vento è importante tenere in considerazione che le foreste, e le diverse aree che le compongono, non rispondono tutte nello stesso modo. Alcune regioni e popolazioni possono subire ripercussioni più pesanti rispetto ad altre. Un esempio, per le Alpi italiane orientali, è rappresentato dalla Valle di Fiemme: le fitte foreste monostratificate di questa zona si sono rivelate alquanto sensibili agli impatti della tempesta Vaia. A determinare in quale modo una foresta riesca a resistere a una tempesta di vento vi sono diversi fattori, e la loro conoscenza può potenzialmente risultare vantaggiosa per una corretta prevenzione delle epidemie. Le variabili consistono nella tipologia di specie, nello stato di salute e nelle altezze degli alberi che compongono la foresta, con le relative strutture del sistema radicale, della chioma e del fusto. Sono inoltre importanti elementi quali le condizioni meteorologiche, le caratteristiche fisiche e le condizioni stazionali dell'area colpita. Risulta però fondamentale riconoscere che tali variabili possono perdere facilmente di rilevanza al raggiungimento di condizioni ambientali estreme, quali quelle provocate dalla tempesta Vaia (Motta *et al.*, 2018).

Tra le conseguenze dei cambiamenti climatici vi è, inoltre, l'innalzamento delle temperature. La temperatura è una variabile abiotica di notevole rilevanza nella regolazione dell'infestazione da *Ips typographus*. Come già esposto in precedenza, ad esempio, la durata dell'intervallo che risiede tra il

completamento dell'attacco da parte della generazione genitoriale e l'abbandono dell'ospite da parte di quella filiale dipende dalle temperature esterne (Kautz *et al.*, 2022). In generale, infatti, le temperature regolano diversi aspetti del ciclo vitale del parassita. Il loro incremento può determinare un più rapido sviluppo delle larve e pupe, nonché un maggiore numero di generazioni prodotte nell'arco di un'unica stagione. Di contro però, temperature eccessive possono indurre una diminuzione dei livelli di fertilità nelle popolazioni. Discostandosi dall'osservare unicamente *Ips typographus*, inoltre, l'innalzamento termico e l'aumento della frequenza e durata dei periodi di siccità possono avere riscontri positivi sull'infestazione anche per gli svantaggi apportati ai nemici naturali del parassita e agli stessi ospiti di quest'ultimo. Gli esemplari di *Picea abies*, infatti, in condizioni di stress idrico riducono la loro capacità di difesa dal parassita e divengono più attaccabili da quest'ultimo (Skrzecz *et al.*, 2018).

Si può concludere, pertanto, che gli effetti dei cambiamenti climatici quali l'innalzamento delle temperature, il conseguente aumento dei periodi di siccità e l'insorgenza di eventi meteorologici estremi, come le tempeste di vento, contribuiscono notevolmente alla diffusione delle epidemie da *Ips typographus* (Grodzki *et al.*, 2020). Nei prossimi anni, i continui cambiamenti climatici condurranno potenzialmente a un ulteriore incremento della frequenza e della dannosità delle infestazioni (Biedermann *et al.*, 2019). È per tale ragione che risulta necessario sviluppare tecniche sempre più consolidate per la prevenzione delle epidemie e la gestione delle foreste (Kautz *et al.*, 2022).

V. TECNICHE DI GESTIONE DELL'EPIDEMIA DA *Ips typographus*

La problematica relativa alle epidemie da *Ips typographus* ha condotto allo sviluppo di tecniche efficaci per la gestione e il controllo della diffusione del parassita. Per un efficace monitoraggio dell'infestazione da *Ips typographus* è necessario valutare diversi fattori. È fondamentale mantenere note e controllate le dimensioni di popolazione dello scolitide, nonché sviluppare tecniche per un'individuazione immediata degli attacchi. Inoltre, risulta

cruciale sviluppare e mantenere le foreste in maniera tale da rafforzare la resistenza e diminuire la vulnerabilità agli attacchi del parassita e agli eventi climatici. A questo riguardo, sono decisive le scelte prese nell'ambito della silvicoltura (Gilles *et al.*, 2024).

Dal momento che la diffusione dell'infestazione da *Ips typographus* è un fenomeno alimentato dai danni provocati dagli eventi meteorologici e climatici estremi, un primo approccio adottato per ridurre il rischio di propagazione dell'epidemia consiste nell'attuare misure di tipo attivo, che prevedano la rimozione degli alberi affetti dal parassita e/o abbattuti dagli eventi atmosferici (Grodzki *et al.*, 2020). Gli interventi attivi risultano essere convenienti per il controllo delle epidemie, in quanto riducono la quantità di materiale accessibile al parassita per la sua riproduzione e, pertanto, portano a un abbassamento dell'intensità con cui si propaga l'infestazione (Grodzki *et al.*, 2019). È importante però chiarire che tali interventi risultano validi solo se effettuati durante la fase iniziale dell'epidemia, ovvero allo stadio verde (Gilles *et al.*, 2024). In tal caso, infatti, consentono di eliminare la covata prima che quest'ultima si sviluppi in una nuova generazione di *Ips typographus* (Kautz *et al.*, 2022).

Al fine di attuare i corretti interventi per la gestione delle epidemie da *Ips typographus* è decisivo rilevare le infestazioni nelle fasi iniziali della loro propagazione. È fondamentale, infatti, lavorare tramite rilevamenti pre-emergenza, ovvero prima dell'abbandono dell'ospite da parte della generazione filiale, in quanto un rilevamento post-emergenza può essere utile solo per la protezione degli alberi vicini a quello attaccato (Kautz *et al.*, 2024). La rilevazione della presenza di *Ips typographus* può essere effettuata prevalentemente attraverso due tecniche: indagini terrestri su scala locale e telerilevamento (Kautz *et al.*, 2022). I due approcci presentano delle differenze:

- **precocità della rilevazione dell'epidemia:** le indagini terrestri consentono di rilevare i sintomi dell'infestazione già dalle prime fasi della sua propagazione, mentre il telerilevamento lavora individuando solamente le sintomatologie che compaiono a partire dalle fasi più

avanzate (Kautz *et al.*, 2024). È importante rendere noto che se l'individuazione di un'infestazione è ritardata, segue un ridotto successo nella gestione e controllo dell'epidemia, nonché un insufficiente intervento di sanificazione (Kautz *et al.*, 2022).

Fatta questa premessa, può risultare utile esporre un esempio sulle potenzialità delle due tecniche. Le indagini terrestri sono una metodologia che permette di individuare dall'inizio lo scolorimento delle chiome degli ospiti, una conseguenza dell'attacco da *Ips typographus* che di norma si sviluppa a partire dalla base della chioma, per poi salire verso il suo apice. Al contrario, le tecniche di telerilevamento identificano le chiome danneggiate dall'infestazione solo a uno stadio di scolorimento più avanzato.

Di contro però, i metodi di telerilevamento si basano su sistemi ottici e radar che consentono di notare, attraverso il riconoscimento di cambiamenti dello spettro, le sintomatologie non osservabili nel campo visibile, quali la riduzione della quantità di clorofilla e la presenza di acqua negli aghi della pianta (Kautz *et al.*, 2022; Kautz *et al.*, 2024);

- **rapporto costi-benefici:** mentre le tecniche di telerilevamento forniscono un'elevata quantità di dati e informazioni in maniera immediata, le indagini sul campo non dispongono della medesima rapidità di analisi. Queste ultime, inoltre, sono più dispendiose e complesse da attuare su larga scala, specialmente in foreste ampiamente estese (Gilles *et al.*, 2024; Kautz *et al.*, 2024).

Oltre a ciò, le tecniche di telerilevamento presentano delle limitazioni nella loro precisione di analisi: non permettono infatti di distinguere gli esemplari di *Picea abies* effettivamente danneggiati dal parassita da quelli che, al contrario, si trovano in una condizione di stress dovuta ad altre cause (Gilles *et al.*, 2024). Allo stesso tempo, sono già state espresse le limitazioni della tecnica legate all'impossibilità di individuare i sintomi precoci dell'infestazione (Kautz *et al.*, 2024).

L'individuazione delle infestazioni nelle fasi più avanzate del loro sviluppo attraverso telerilevamento può risultare vantaggiosa per consentire, attraverso i monitoraggi terrestri, l'identificazione di focolai più recenti nelle aree circostanti (Kautz *et al.*, 2022). Le tecniche di telerilevamento, a questo proposito, risultano convenienti come guide delle indagini terrestri, rendendo possibili immediati interventi di sanificazione nelle regioni circostanti (Kautz *et al.*, 2024). Per quanto riguarda le indagini di tipo terrestre, un esempio di tecnica adottata per la realizzazione di queste prevede l'impiego di cani da fiuto, specializzati nel riconoscimento e nell'individuazione del rosone secreto dagli esemplari di *Picea abies*, in risposta allo stress causato dall'attacco del parassita (Kautz *et al.*, 2022).

Analizzate le tecniche di identificazione delle aree colpite da *Ips typographus*, è importante soffermarsi anche sulle numerose tecniche che possono essere messe in atto per far fronte alla diffusione del parassita, e per ridurre i danni da questo provocati. Si distinguono tecniche di controllo chimiche e metodologie di biocontrollo. Queste ultime, in particolare, consistono nell'utilizzo dei nemici naturali del parassita per mantenerne ridotte le densità di popolazione (Hyblerová *et al.*, 2021). Per quanto riguarda le tecniche chimiche, vi sono le trappole a feromoni. Queste consistono in trappole artificiali contenenti feromoni sintetici, che consentono di raccogliere informazioni affidabili sullo stato delle popolazioni del parassita e sull'entità dei danni causati dall'epidemia. La loro efficacia e funzionalità non si limita al monitoraggio di una singola stagione riproduttiva, in quanto utili anche per osservare e comprendere gli andamenti delle popolazioni del parassita nell'arco di più stagioni consecutive (Grodzki *et al.*, 2020). Nonostante in genere le tecniche di controllo chimico non vengano applicate nelle aree protette, in quanto non concordi con le limitazioni imposte in tali ambienti, le trappole a feromoni sono rispettose di tali restrizioni e, pertanto, comunemente adottate anche nelle riserve naturali (Grodzki *et al.*, 2020; Hyblerová *et al.*, 2021).

Alla luce di tutto ciò è importante evidenziare la necessità di sviluppare nuove metodologie di gestione, al fine di ridurre con un successo sempre maggiore

l'intensità e la velocità di diffusione delle epidemie (Kautz *et al.*, 2024). Ad amplificare l'urgenza di tale esigenza sono i dati relativi alla diffusione delle infestazioni in relazione ai cambiamenti climatici. Nei prossimi anni, infatti, le frequenze di infestazione e la pericolosità di tali fenomeni biotici potranno aumentare, alimentate dall'andamento delle condizioni ambientali. È per tale ragione che risulta necessario potenziare il progresso scientifico per un sempre maggiore miglioramento della gestione delle foreste di *Picea abies* e delle popolazioni di *Ips typographus* (Kautz *et al.*, 2022).

BIBLIOGRAFIA

Biedermann P. H. W., Muller J., Gregoire J., Gruppe A., Haggé J., Hammerbacher A., Hofstetter R. W., Kandasamy D., Kolarik M., Kostovcik M., Krokene P., Sallé A., Six D. L., Turrini T., Vanderpool D., Wingfield M. J., Bassler C. "Bark Beetle Population Dynamics in the Anthropocene: Challenges and Solutions." *Trends in Ecology & Evolution*, vol. 34, no. 10, Oct. 2019, pp. 914–924.

Blake M., Straw N., Kendall T., Whitham T., Manea I. A., Inward D., Jones B., Hazlitt N., Ockenden A., Deol A., Brown A., Ransom E., Smith L., Facey S. "Recent Outbreaks of the Spruce Bark Beetle *Ips typographus* in the UK: Discovery, Management, and Implications." *Trees, Forests and People*, vol. 16, 1 June 2024, pp. 100508–100508.

Chirici G., Giannetti F., Travaglini D., Nocentini S., Francini S., D'Amico G., Calvo E., Fasolini D., Broll M., Maistrelli F., Tonner J., Pietrogiovanna M., Oberlechner K., Andriolo A., Comino R., Faidiga A., Pasutto I., Carraro G., Zen S., Contarin F., Alfonsi L., Wolynski A., Zanin M., Cagliano C., Tonolli S., Zoanetti R., Tonetti R., Cavalli R., Lingua E., Pirotti F., Grigolato S., Bellingeri D., Zini E., Gianelle D., Dalponte M., Pompei E., Stefani A., Motta R., Morresi D., Garbarino M., Alberti G., Valdevit F., Tomelleri E., Torresani M., Tonon G., Marchi M., Corona P., Marchetti M. "Forest Damage Inventory after the "Vaia" Storm in Italy." *Forest@*, vol. 16, no. 1, 28 Feb. 2019, pp. 3–9.

Gilles A., Lisein J., Cansell J., Latte N., Piedallu C., Claessens H. “Spatial and Remote Sensing Monitoring Shows the End of the Bark Beetle Outbreak on Belgian and North-Eastern France Norway Spruce (*Picea Abies*) Stands.” *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 196, no. 3, 2 Feb. 2024.

Grodzki W., Fronck W. G. “The European Spruce Bark Beetle *Ips Typographus* (L.) in Wind-Damaged Stands of the Eastern Part of the Tatra National Park – the Population Dynamics Pattern Remains Constant.” *Folia Forestalia Polonica. Seria A, Leśnictwo*, vol. 61, no. 3, 1 Sept. 2019, pp. 174–181.

Grodzki W. “Do Pheromone Trapping Always Reflect *Ips Typographus* (L.) Population Level? A Study from the Tatra National Park in Poland.” *Folia Forestalia Polonica*, vol. 63, no. 1, 1 Mar. 2021, pp. 36–47.

Hyblerová S., Medo J., Barta M. “Diversity and Prevalence of Entomopathogenic Fungi (Ascomycota, Hypocreales) in Epidemic Populations of Bark Beetles (Coleoptera, Scolytinae) in Spruce Forests of the Tatra National Park in Slovakia.” *Annals of Forest Research*, vol. 64, no. 1, 29 June 2021, pp. 129–145.

Hýsek Š., Lowe R., Turcani M. “What Happens to Wood after a Tree Is Attacked by a Bark Beetle?” *Forests*, vol. 12, no. 9, 1 Sept. 2021, p. 1163.

Jaakkola E., Gartner A., Jonsson A. M., Ljung K., Olsson P., Holst T. “Spruce Bark Beetles (*Ips Typographus*) Cause up to 700 Times Higher Bark BVOC Emission Rates Compared to Healthy Norway Spruce (*Picea Abies*).” *Biogeosciences*, vol. 20, no. 4, 20 Feb. 2023, pp. 803–826.

Jirošová A., Modlinger R., Hradecký J., Ramakrishnan R., Beránková K., Kandasamy D. “Ophiostomatoid Fungi Synergize Attraction of the Eurasian Spruce Bark Beetle, *Ips Typographus* to Its Aggregation Pheromone in Field Traps.” *Frontiers in Microbiology*, vol. 13, 20 Sept. 2022.

Kandasamy D., Zaman R., Nakamura Y., Zhao T., Hartmann H., Andersson M. N., Hammerbacher A., Gershenson J., Agrawal A. A. “Conifer-Killing Bark Beetles Locate Fungal Symbionts by Detecting Volatile Fungal

Metabolites of Host Tree Resin Monoterpenes.” *PLOS Biology*, vol. 21, no. 2, 21 Feb. 2023, p. e3001887.

Kautz M., Peter F. J., Harms L., Kammen S., Delb H. “Patterns, Drivers and Detectability of Infestation Symptoms Following Attacks by the European Spruce Bark Beetle.” *Journal of Pest Science (2004. Print)*, vol. 96, no. 1, 15 Apr. 2022, pp. 403–414.

Kautz M., Feurer J., Adler P. “Early Detection of Bark Beetle (*Ips Typographus*) Infestations by Remote Sensing – a Critical Review of Recent Research.” *Forest Ecology and Management*, vol. 556, 1 Mar. 2024, pp. 121595–121595.

Korolyova N., Buechling A., Duraciovà R., Zabihi K., Turcàni M., Svoboda M., Blàha J., Swarts K., Polàcek M., Hradecky J., Cervenka J., Nemcàk P., Schlyter F., Jakus R. “The Last Trees Standing: Climate Modulates Tree Survival Factors during a Prolonged Bark Beetle Outbreak in Europe.” *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 322, July 2022, p. 109025.

Marangon D., Betetto C., Wohlgemuth T., Cadez L., Alberti G., Tomelleri E., Lingua E. “Impact of Salvage Logging on Short-Term Natural Regeneration in Montane Forests of the Alps after Large Windthrow Events.” *Forest Ecology and Management*, vol. 567, 1 Sept. 2024, pp. 122085–122085.

Motta R., Ascoli D., Corona P., Marchetti M., Vacchiano G. “Silviculture and Wind Damages. The Storm “Vaia.”” *Forest@ - Rivista Di Selvicoltura Ed Ecologia Forestale*, vol. 15, no. 1, 31 Dec. 2018, pp. 94–98.

Netherer S., Kandasamy D., Jirosovà A., Kalinová B., Schebeck M., Schlyter F. “Interactions among Norway Spruce, the Bark Beetle *Ips Typographus* and Its Fungal Symbionts in Times of Drought.” *Journal of Pest Science*, vol. 94, no. 3, 22 Feb. 2021, pp. 591–614.

Netherer S., Lehmannski L., Bachlehner A., Rosner S., Savi T., Schmidt A., Huang J., Paiva M. R., Mateus E., Hartmann H., Gershenson J. “Drought Increases Norway Spruce Susceptibility to the Eurasian Spruce Bark Beetle

and Its Associated Fungi.” *New Phytologist*, vol. 242, no. 3, 3 Mar. 2024, pp. 1000–1017.

Schebeck M., Schopf A., Ragland G. J., Stauffer C., Biedermann P. H. W. “Evolutionary Ecology of the Bark Beetles *Ips Typographus* and *Pityogenes Chalcographus*.” *Bulletin of Entomological Research*, vol. 113, no. 1, 14 Oct. 2022, pp. 1–10.

Skrzecz I., Perlińska A. “Current Problems and Tasks of Forest Protection in Poland.” *Folia Forestalia Polonica*, vol. 60, no. 3, 1 Sept. 2018, pp. 161–172.

Sousa M., Birgersson G., Karlsson Green K., Pollet M., Becher P. G. “Odors Attracting the Long-Legged Predator *Medetera Signaticornis* Loew to *Ips Typographus* L. Infested Norway Spruce Trees.” *Journal of Chemical Ecology*, vol. 49, no. 7-8, 31 Jan. 2023, pp. 451–464.

Takov D., Pilarska D., Linde A., Barta M. “Infectious and Parasitic Diseases of Phytophagous Insect Pests in the Context of Extreme Environmental Conditions.” *Central European Forestry Journal*, vol. 67, no. 2, 12 May 2021, pp. 72–84.