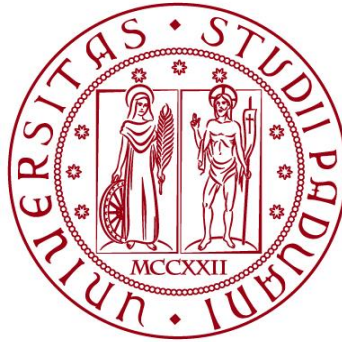


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI BIOLOGIA

Corso di Laurea in Biologia



ELABORATO DI LAUREA

**Allevamento di insetti edibili per un futuro più
sostenibile: i potenziali rischi ecologici di
Acheta domestica (Linnaeus, 1758)**

**Tutor: Prof. Lorenzo Zane
Dipartimento di Biologia**

Laureanda: Sara Marogna

ANNO ACCADEMICO 2023/2024

INDICE

1. INTRODUZIONE	1
2. CARATTERISTICHE PECULIARI DEGLI INSETTI EDIBILI	4
<i>2.1 Maggiore efficienza energetica</i>	4
<i>2.2 Maggiore potenziale riproduttivo e minore richiesta di spazio</i>	6
<i>2.3 Minore impatto ambientale</i>	7
3. POTENZIALI RISCHI ECOLOGICI DELL'ALLEVAMENTO DI INSETTI EDIBILI NON AUTOCTONI	8
<i>3.1 Il caso di Acheta domesticus come minaccia fitosanitaria</i>	8
3.1.1 Materiali e metodi	10
3.1.2 Risultati	12
<i>3.2 Impatto sulle comunità native di insetti</i>	16
4. CONCLUSIONI E PROSPETTIVE FUTURE	18
5. BIBLIOGRAFIA	20

1. INTRODUZIONE

La popolazione umana mondiale è in rapido aumento e secondo le stime più attendibili delle Nazioni Unite è previsto che raggiungerà i 9.7 miliardi entro il 2050 (1). La crescita della popolazione umana pone molte sfide, tra cui la necessità di incrementare la produzione alimentare per soddisfare la domanda crescente, di garantire la disponibilità di cibo per tutti, di gestire in modo sostenibile il territorio e le risorse naturali e di affrontare gli impatti negativi sull'ambiente (2).

La questione della sicurezza alimentare globale è oggetto di un acceso dibattito, da cui emerge un crescente interesse nell'utilizzo di nuove tecnologie innovative per la produzione alimentare. Inoltre, la richiesta di proteine è in costante crescita e per questo la ricerca e l'innovazione alimentare stanno puntando verso la ricerca di fonti proteiche sostenibili. Un sistema alimentare sostenibile è per definizione un sistema progettato per assicurare la sicurezza alimentare e la nutrizione per tutti e per le generazioni future, senza compromettere le basi economiche, sociali e ambientali (2).

Una delle problematiche che attualmente si osserva nella produzione agricola è quella di una significativa dipendenza dai combustibili fossili, e del fatto che, mentre il consumo energetico è in costante aumento, i rendimenti agricoli non seguono la stessa tendenza crescente, evidenziando un certo grado di inefficienza nell'uso dell'energia (2). Analizzando poi la produzione zootecnica, essa ha un forte impatto sull'ambiente, determinando tra l'altro una perdita di biodiversità con conseguente impoverimento dei biosistemi, una ridotta disponibilità di acqua dolce e contribuendo significativamente al riscaldamento globale (2). Se si considerano le emissioni derivanti dall'uso dei terreni per il foraggiamento, l'energia impiegata per la coltivazione di cereali destinati all'alimentazione animale e il trasporto di carni e mangimi alle aziende di

trasformazione e ai venditori, la produzione zootecnica è infatti responsabile di circa l'80% delle emissioni di gas serra nel settore agricolo (2).

In questo contesto, si osserva un crescente interesse verso approcci alternativi volti a ridurre l'impatto ambientale della produzione zootecnica e a soddisfare la crescente domanda di proteine (2). Il mini-allevamento (*minilivestock*), che consiste nell'allevare a scopo alimentare organismi di dimensioni ridotte, in particolare insetti, appare come una soluzione valida poiché potenzialmente può risolvere il problema della carenza di proteine animali, con un impatto ambientale significativamente minore (3). Nella tabella 1 sono riportate le specie di insetti più comunemente allevate a livello industriale e considerate disponibili per il consumo umano.

Tabella 1. Principali specie di insetti allevate per il consumo umano e rispettivo tipo di dieta. Tabella tratta da (4) e modificata.

Specie	Nome comune	Tipo di dieta
<i>Acheta domesticus</i>	Grillo domestico	Polifaga
<i>Locusta migratoria</i>	Locusta africana	Erbivora
<i>Zophobas morio</i>	Verme gigante della farina	Granivora
<i>Tenebrio molitor</i>	Verme della farina	A base di farina di cereali
<i>Alphitobius diaperinus</i>	Verme bufalo	A base di farina di cereali
<i>Schistocerca americana</i>	Locusta del deserto americana	Erbivora
<i>Bombyx mori</i>	Baco da seta	Erbivora
<i>Rhynchophorus ferrugineus</i>	Punteruolo rosso della palma	Erbivora

Tra i vantaggi legati all'allevamento di insetti rispetto alla zootecnia tradizionale, troviamo la necessità di una minore quantità d'acqua, di spazio e di risorse necessarie per lo sviluppo e la crescita degli animali, un'impronta di carbonio

inferiore, una migliore efficienza di conversione e una maggiore fecondità con tempi più brevi del ciclo riproduttivo (2).

Tuttavia, le caratteristiche biologiche che rendono gli insetti adatti all'allevamento di massa sono le stesse che potrebbero renderli specie invasive di successo, il che potrebbe comportare considerevoli danni (5). Nel caso specifico del grillo domestico (*Acheta domesticus* (Linnaeus, 1758)), l'impatto sull'agricoltura e l'invasività della specie sono stati largamente trascurati e i cambiamenti climatici possono addirittura aggravare la situazione, in quanto questa specie potrebbe essere favorita in condizioni aride perché avrebbe un vantaggio competitivo sulle specie autoctone in quanto in grado di nutrirsi efficientemente in condizioni di vegetazione limitata (6). L'incertezza riguardo ai benefici ambientali dell'allevamento di insetti è strettamente correlata alla scarsa conoscenza su molti aspetti della produzione, ed è quindi indispensabile che gli ecologi conducano studi mirati a valutare i criteri di sostenibilità associati allo sviluppo di questo settore (7).

2. CARATTERISTICHE PECULIARI DEGLI INSETTI EDIBILI

L'allevamento degli insetti edibili (figura 1) come alternativa al tradizionale allevamento di bestiame offre una serie di vantaggi significativi per la produzione alimentare (3).



Figura 1. Strutture per l'allevamento di insetti: piccoli centri di allevamento (a, b) e grandi strutture di allevamento industriale (c, d). Figura tratta da (5).

2.1 Maggiore efficienza energetica

Gli insetti allevati sono principalmente erbivori (tabella 1) e grazie alle loro peculiari strutture biologiche e caratteristiche fisiologiche, garantiscono una maggiore efficienza di conversione delle proteine vegetali in proteine animali e quindi del mangime utilizzato per l'allevamento in cibo per il consumo umano (*feed-to-food*), rispetto al bestiame convenzionale. Infatti, secondo le statistiche per gli Stati Uniti, il rapporto di conversione del mangime (FCR) è notevolmente inferiore negli insetti rispetto ai polli, ai suini e ai bovini, con rispettivi valori di 1.7, 2.5, 5 e 10 (tabella 2). Un FCR basso indica un'elevata efficienza nella conversione del mangime in massa corporea; quindi per esempio, nel caso del grillo, un FCR di 1.7 significa che per ogni 1.7 kg di mangime consumato, l'animale aumenta di 1 kg di massa corporea. Tuttavia, è fondamentale considerare che i FCR possono variare in modo significativo in base alle pratiche utilizzate per la produzione della carne, nonché a seconda della classe di animali considerata (2).

Inoltre, il valore nutrizionale della carne di insetti risulta molto interessante, in quanto caratterizzato da una maggior quantità di proteine, con valori di 150, 190, 200 e 205 grammi di proteine per chilogrammo di massa edibile rispettivamente in maiale, manzo, pollame e grillo (tabella 2) (2).

L'elevata efficienza energetica complessiva degli insetti è attribuibile al fatto che sono pecilotermi, ovvero possono regolare la loro temperatura corporea per adattarla alla temperatura dell'ambiente circostante. Di conseguenza, non devono investire energia alimentare nel mantenere una temperatura corporea costante al di sopra dei valori ambientali, come invece avviene negli omeotermi e, quindi, nel bestiame. Inoltre, gli insetti presentano una maggiore frazione di massa commestibile, con una percentuale dell'80% nel grillo in paragone al 40% del manzo e al 55% del pollo e del maiale (tabella 2), il che rappresenta un ulteriore contributo sostanziale alla loro elevata efficienza energetica (3).

Tabella 2. Efficienze di produzione di carne di grillo, pollo, maiale e manzo. Tabella tratta da (8) e modificata.

	Grillo	Pollo	Maiale	Manzo
Percentuale di massa corporea edibile (%)	80	55	55	40
Rapporto di conversione del mangime (kg di mangime : kg di massa corporea edibile)	1.7	2.5	5	10
Contenuto proteico (g di proteine : kg di massa corporea edibile)	205	200	150	190

2.2 Maggiore potenziale riproduttivo e minore richiesta di spazio

Uno dei vantaggi nell'utilizzo degli insetti è legato al loro maggiore potenziale riproduttivo rispetto al bestiame. Per fare un paragone, ad ogni ciclo riproduttivo ciascun insetto genera una prole numerosa, composta da migliaia di individui, mentre il bestiame dà alla luce soltanto un numero limitato di individui. Inoltre, gli insetti hanno tempi di riproduzione più brevi e raggiungono l'età adulta, intesa come maturità sessuale, in pochi giorni, mentre i ruminanti impiegano anni per raggiungere tale fase. Di conseguenza, con gli insetti è possibile ottenere un tasso di produzione proteica molto più elevato (3).

Un ulteriore vantaggio dell'allevamento di insetti è legato al fatto che, grazie alle loro dimensioni ridotte, necessitano di uno spazio decisamente inferiore rispetto al bestiame per essere allevati e riprodotti. In alcuni studi condotti, è stato calcolato e confrontato il fabbisogno di terreno necessario per produrre proteine di insetti, in particolare vermi della farina, rispetto alla stessa quantità di proteine ottenute da latte, maiale, pollo e manzo, considerando il ciclo di vita di ciascun organismo. È emerso che, per ogni ettaro di terreno impiegato nella produzione di una determinata quantità di proteine di vermi della farina, la produzione dell'equivalente quantità di proteine derivanti da latte, maiale, pollo e manzo richiede, rispettivamente, un terreno di 2.5, 2-3.5, 2-3.5, e 10 ettari. Questi dati sono variabili a seconda delle diverse specie di insetti, ma sono comunque rilevanti per indicare che l'area richiesta per la produzione di proteine a base di insetti è considerevolmente inferiore a quella richiesta per i macro-allevamenti di bestiame (3).

2.3 Minore impatto ambientale

Complessivamente la produzione di insetti ha un impatto ambientale nettamente inferiore rispetto alla produzione di pollame, suini e bovini, soprattutto in termini di consumo d'acqua, uso del suolo e conversione del mangime. Per fare un esempio comparativo, è noto che, rispetto ai grilli, la produzione di 1 chilogrammo di carne bovina richiede una quantità 3000 volte maggiore di acqua, 12.5 volte maggiore di mangime e un'area di allevamento molto più vasta, considerato che i terreni di pascolo estensivo destinati al bestiame sono di dimensioni nettamente maggiori in confronto ai piccoli contenitori destinati agli insetti (figura 2) (2).

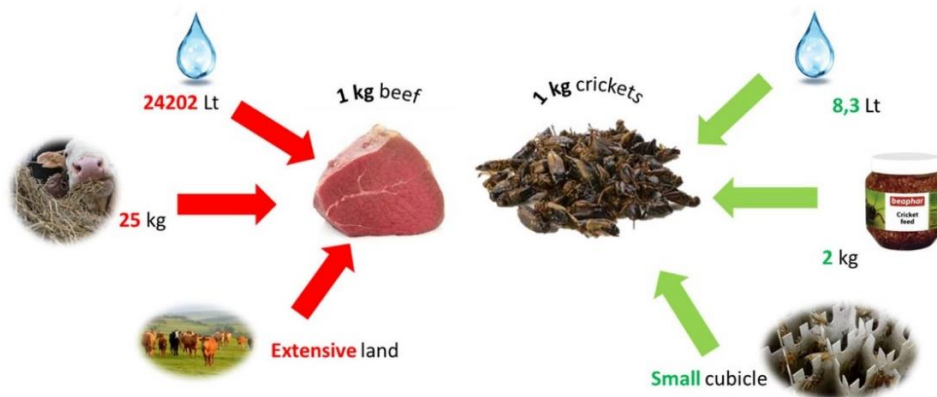


Figura 2. Confronto tra bilancio input/output nella produzione di carne bovina e di grilli. Figura tratta da (2).

Contribuiscono indirettamente a mitigare il riscaldamento globale grazie alle loro ridotte emissioni di gas serra rispetto al bestiame convenzionale. In alcune ricerche è stato documentato che la quantità di CO₂ prodotta per ogni chilogrammo di aumento di massa corporea degli insetti è pari a 337 grammi, valore che rappresenta solo il 39% di quella prodotta dai suini e addirittura solo il 12% di quella prodotta dai bovini. In altre parole, gli insetti producono decisamente meno CO₂ rispetto a suini e bestiame per ottenere lo stesso incremento di massa corporea. Inoltre, prendendo in considerazione le emissioni di NH₃, è stato osservato che un maiale emette 8-12 volte più NH₃ rispetto a un grillo e fino a 50 volte più NH₃ rispetto a una locusta (3).

3. POTENZIALI RISCHI ECOLOGICI DELL'ALLEVAMENTO DI INSETTI EDIBILI NON AUTOCTONI

In molti paesi europei persiste una mancanza di valutazione del rischio relativo alle specie di insetti non autoctoni allevati a scopo alimentare, soprattutto per quanto riguarda la comprensione del loro potenziale invasivo e degli effetti che possono avere sulle specie autoctone (9).

3.1 Il caso di *Acheta domesticus* come minaccia fitosanitaria

Questo sottocapitolo è dedicato all'analisi di alcuni aspetti relativi alla potenziale minaccia fitosanitaria rappresentata dal grillo domestico, trattati nell'articolo di Kulesa A.K., et al. intitolato "*Assessing the potential phytosanitary threat of the house cricket Acheta domesticus*", pubblicato sulla rivista "Science of The Total Environment" nel marzo 2024.

Il grillo domestico, scientificamente denominato *Acheta domesticus* (Linnaeus, 1758), proviene da zone dell'Asia sudoccidentale o dell'Africa settentrionale e rappresenta una delle specie di insetti maggiormente allevate a livello industriale.

La sua produzione di massa in Europa, in qualità di insetto non autoctono, suscita preoccupazioni riguardo le fughe accidentali, che possono provocare una diffusione massiccia e causare danni fitosanitari gravi agli ecosistemi autoctoni. L'elevato rischio di danno ai raccolti e al grano immagazzinato è accentuato dalla combinazione di alcune caratteristiche biologiche tipiche degli insetti, come la rapida proliferazione, la notevole capacità di adattamento e l'alimentazione opportunistica.

A dimostrazione di ciò, sono stati condotti degli esperimenti di risposta funzionale per testare le potenzialità di *A. domesticus* come minaccia

fitosanitaria in un contesto di riscaldamento globale. Per “minacce fitosanitarie” si intendono i rischi correlati all’agricoltura e agli ecosistemi, con possibili conseguenze negative sulla sicurezza alimentare, sulla biodiversità e sul benessere dell’uomo, ed è previsto che l’aumento delle temperature aggraverà tali impatti.

Quando una specie “non nativa” viene introdotta, sia volontariamente che involontariamente, in una nuova area, può essere in grado di stabilirsi, crescere e diffondersi, acquisendo poi il titolo di specie “invasiva”. È noto che alcune specie di ortotteri, tra cui *A. domesticus*, sono caratterizzate da una rapida capacità di diffusione e insediamento in nuove aree. I cambiamenti climatici influenzano in primis la vegetazione e gli habitat, creando di conseguenza potenziali condizioni favorevoli alla distribuzione di tali specie, che possono quindi insediarsi e proliferare in zone precedentemente inadeguate. Pertanto, l’effetto complessivo è un ampliamento della loro distribuzione globale. *A. domesticus*, infatti, è attualmente diffuso su scala globale grazie alla sua abilità di sfruttare diversi percorsi e mezzi di dispersione, tra cui ad esempio il trasporto di merce agricola. È stato in grado di adattarsi a condizioni variabili e a nuovi habitat urbanizzati anche in virtù della sua alimentazione generalista, anche se tale qualità lo rende un rilevante parassita per i raccolti immagazzinati. Tuttavia, la sua potenziale invasività e il rischio di rappresentare una minaccia fitosanitaria sono stati piuttosto trascurati.

A tal proposito sono stati condotti degli esperimenti di risposta funzionale, i quali consentono di analizzare l’interazione tra l’abbondanza di prede e il tasso di alimentazione del predatore. In particolare, lo scopo era quello di esaminare l’influenza di *A. domesticus* su colture economicamente rilevanti e valutarne il relativo rischio fitosanitario. Si prevedeva che l’innalzamento delle temperature influenzasse la risposta funzionale, poiché negli organismi pecilotermi potrebbe causare un’accelerazione del metabolismo, dello sviluppo e della riproduzione, con un conseguente incremento della richiesta di risorse.

Questi esperimenti sono stati eseguiti inizialmente utilizzando maschi e femmine di *A. domesticus* come predatori e semi di miglio e semi di grano come prede, e successivamente sottoponendoli a un aumento graduale della temperatura, in modo da simulare l'effetto del riscaldamento globale. Le ipotesi erano:

- a) le femmine presentano tassi di consumo superiori rispetto ai maschi in quanto hanno bisogno di più energia da destinare alla riproduzione;
- b) la gravità del danno varia a seconda del tipo di seme;
- c) a temperature più elevate, i tassi di consumo aumentano poiché vi è un'accelerazione del metabolismo.

3.1.1 Materiali e metodi

Come primo step, i campioni di *A. domesticus* sono stati sottoposti ad acclimatazione. Sono stati mantenuti a una temperatura controllata di 25°C e collocati in appositi contenitori di plastica che contenevano alcuni cartoni di uova, utilizzabili come riparo. A giorni alterni questi contenitori venivano puliti, mentre quotidianamente veniva fornito cibo in eccesso agli individui. Per favorire il loro adattamento, sono stati esposti per una settimana a un ciclo di luce giorno-notte controllato, con luce dalle 7:00 alle 10:00 del mattino e buio nel resto della giornata. Durante questa fase non sono stati riscontrati aumenti significativi nella mortalità dei campioni. Gran parte dei grilli sono poi stati trasferiti in tre terrari, ciascuno dei quali posizionato all'interno di un incubatore, con l'obiettivo di acclimatarli a temperature di 20, 25 e 30°C. Il mantenimento dei campioni è stato simile a quello nei contenitori di plastica, con un rifornimento di cibo in eccesso e di cartoni di uova, una pulizia quotidiana e un'esposizione controllata alla luce. Per evitare di stressare i campioni, le temperature finali prefissate di 20 e 30°C sono state raggiunte in modo graduale variando la temperatura iniziale di 2°C per due giorni di seguito e poi di 1°C nel terzo giorno.

Successivamente sono stati eseguiti dei test preliminari per determinare, tra fiocchi d'avena, crusca di grano, chicchi di grano e semi di miglio, quali fossero le

prede più adatte agli esperimenti di risposta funzionale. Un sottogruppo di grilli è stato quindi sistemato in scatoline di plastica più piccole, con condizioni di luce e temperatura controllate, e fornito per 24 ore di acqua, ma non di cibo. Dopo un intero giorno a digiuno, sono state introdotte nella scatola 10 prede di ogni tipo e sono stati osservati i risultati del comportamento alimentare dei grilli nei confronti dei diversi tipi di semi. La crusca di grano e i fiocchi d'avena sono risultati inadeguati per gli esperimenti di risposta funzionale, in quanto non permettevano di misurare precisamente la quantità di cibo danneggiato o consumato. Al contrario, i chicchi di grano e i semi di miglio si sono dimostrati adatti per lo svolgimento degli esperimenti di risposta funzionale, nonostante i chicchi di grano fossero di dimensioni maggiori rispetto ai semi di miglio e quindi consumati interamente dai grilli con una minore frequenza. Infatti, in media $0,2 \pm 0,42$ chicchi di grano sono stati consumati completamente e $4,7 \pm 1,8$ parzialmente, rispetto alla media di $3,6 \pm 1,4$ semi di miglio consumati completamente e $5,5 \pm 1,6$ parzialmente.

Per testare l'ipotesi a, ovvero capire se veramente le femmine consumano una quantità maggiore di cibo rispetto ai maschi, sono state eseguite 10 ripetizioni per ciascuna densità di semi di miglio (1, 2, 5, 10, 15, 20), utilizzando un individuo diverso (maschile o femminile) ad ogni ripetizione. Per testare l'ipotesi b, ovvero verificare se ci sono differenze nel danno a seconda del tipo di seme, sono state eseguite 10 ripetizioni per ciascuna densità di semi di grano (1, 2, 5, 10, 15, 20), sempre utilizzando un individuo diverso (femminile) ad ogni ripetizione. Per testare infine l'ipotesi c, ovvero valutare se il riscaldamento climatico influisce sul rischio di *A. domesticus* di costituire una minaccia fitosanitaria, sono stati condotti gli stessi esperimenti eseguiti per testare le ipotesi a e b ma alle tre diverse temperature di 20, 25 e 30°C. Alla fine di ogni studio è stato annotato il numero di semi completamente consumati, il numero di semi parzialmente consumati e la somma di questi, che rappresenta il numero di semi rovinati.

Ogni serie di misure rilevate negli esperimenti per testare le ipotesi a e b è stata confrontata tra i gruppi di maschi e femmine sottoposti alle tre diverse temperature, utilizzando test dei rank di Wilcoxon sulle mediane. In particolare, è stata utilizzata la funzione *pairwise.wilcox.test*.

Per analizzare poi le risposte funzionali e identificare il tipo di risposta di *A. domesticus* maschio e femmina a diversi tipi di semi e a diverse temperature (ipotesi c), è stata utilizzata la funzione *fair_test*. La maggior parte delle risposte mostrava una corrispondenza con il modello di risposta funzionale di tipo II di Rogers, che è stato poi adattato utilizzando la funzione *frair_fit*:

$$N_e = N_o (1 - \exp(a (N_e h - T)))$$

dove N_e si riferisce al numero di semi danneggiati, N_o si riferisce alla densità iniziale dei semi, a è il tasso di attacco, h è il tempo di manipolazione e T è il periodo totale dell'esperimento (24 ore). Quindi, le curve di risposta funzionale sono state confrontate utilizzando intervalli di confidenza al 95%, calcolati con la funzione *frair_boot*. Sono state osservate differenze significative tra i gruppi quando i loro intervalli di confidenza non si sovrapponevano, mentre si è dedotta una mancanza di significatività quando gli intervalli di confidenza si sovrapponevano.

3.1.2 Risultati

L'ipotesi a è stata confutata, in quanto non sono emerse differenze significative tra maschi e femmine nel numero di semi rovinati, con una probabilità dei test di Wilcoxon sempre maggiore della soglia utilizzata di 0.05. La mancanza di differenze tra maschi e femmine è evidente anche nel grafico riportato in figura 3 a-b, che mostra un andamento sovrapponibile per i due sessi.

L'ipotesi b è stata invece confermata, poiché, a tutte e tre le temperature di 20, 25 e 30°C è stato riscontrato un numero complessivo di semi di miglio rovinati superiore rispetto ai semi di grano, con una probabilità dei test di Wilcoxon sempre minore della soglia utilizzata di 0.05. Inoltre, a prescindere dalla temperatura, questa osservazione era maggiormente evidente nelle prove

condotte a densità di semi più elevate, mentre a basse densità di semi non è stata rilevata una differenza sostanziale nel danno ai due diversi tipi di semi (figura 3 a-c). È emerso inoltre che il tasso di semi completamente consumati dai grilli diminuiva all'aumentare della disponibilità di semi.

Per quanto concerne l'ipotesi c, gli esperimenti hanno dimostrato che la temperatura ha avuto un notevole impatto sul tasso di consumo completo dei semi di miglio e sul tasso di consumo parziale dei semi di grano. A temperature più elevate, infatti, si verificava un maggiore consumo completo di semi di miglio, ma non di semi di grano, che è rimasto costante alle tre temperature crescenti, e un maggiore consumo parziale di semi di grano, ma non di semi di miglio, che è rimasto costante alle tre temperature crescenti (figura 3 b-c). In definitiva, i danni complessivi al miglio sono risultati costanti in seguito all'aumento della temperatura, mentre i danni complessivi al grano sono cresciuti proporzionalmente ad essa.

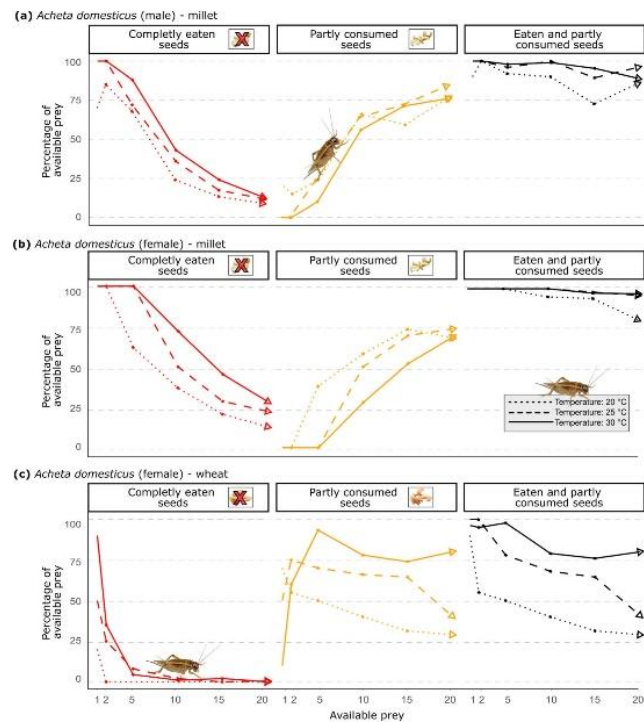


Figura 3. Confronto tra il consumo di semi di miglio da parte di maschi (a) e femmine (b) di *Acheta domestica* e di semi di grano da parte di femmine (c) alle temperature di 20, 25, 30°C in relazione alla quantità di semi disponibili (1, 2, 5, 10, 15, 20). I semi completamente consumati sono rappresentati graficamente in rosso, i semi parzialmente consumati in arancione e i semi complessivamente danneggiati in nero. Figura tratta da (6).

Sono state infine analizzate le curve di risposta funzionale per i semi danneggiati (figura 4 a-b), che si allineavano con la risposta funzionale di tipo II di Rogers. In particolare, sia per gli individui maschili che per quelli femminili, le curve di risposta funzionale relative ai semi di miglio a 20°C sono rimaste leggermente al di sotto di quelle a 25 e 30 °C, che si sovrapponevano, ad evidenziare quindi ridotte variazioni tra maschi e femmine alle tre temperature sperimentali. Infatti, quando i campioni avevano a disposizione la massima densità di semi, il danno è stato di circa 16-19 semi per le femmine e 15-19 semi per i maschi.

Mediante le curve si è poi evidenziato anche che ci sono differenze tra il tasso di consumo del miglio e del grano (figura 4 b-c), e che vi è una correlazione tra temperatura e gravità del danno. Infatti, quando i campioni avevano a disposizione la massima densità di semi di grano, alla temperatura di 20°C il danno è stato in media di 5 semi, mentre alla temperatura di 30° è stato di circa 15 semi.

In conclusione, l'incremento della temperatura a cui sono stati esposti i campioni ha causato un aumento nei tassi di attacco, sia nei maschi che nelle femmine, fino alla temperatura di 25°C. Al di là di questa temperatura non è stato possibile misurare il tasso di attacco nei maschi, mentre è diminuito nelle femmine. Con l'aumentare della temperatura si è osservato anche che i maschi impiegavano più tempo per manipolare i semi, mentre le femmine ne impiegavano di meno. Complessivamente, il tasso di attacco verso i semi di miglio è risultato maggiore rispetto ai semi di grano, e con l'aumento della temperatura il danno si è rivelato ulteriormente crescente.

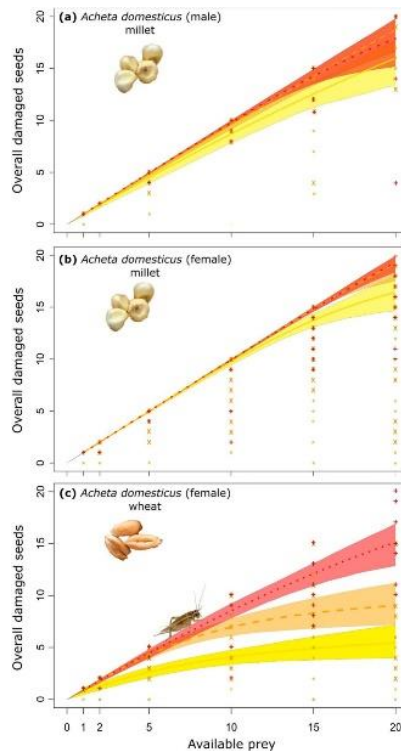


Figura 4. Confronto tra curve di risposta funzionale per maschi (a) e femmine (b) di *Acheta domesticus* esposti a semi di miglio e per femmine (c) esposte a semi di grano, alle temperature di 20, 25, 30°C e a una densità di semi di 1, 2, 3, 5, 10, 15, 20. Figura tratta da (6).

I risultati ottenuti evidenziano il potenziale di *A. domesticus* di rappresentare una potenziale minaccia fitosanitaria, specialmente nel contesto dell'aumento delle temperature globali previsto nel corso dei prossimi decenni. Il pericolo risiede nel fatto che, per il loro tipo di alimentazione opportunistica, se proliferano e si diffondono, possono accedere ai terreni coltivati o ai silos che contengono i raccolti. La gravità del danno che possono causare è strettamente correlata al tipo di seme coltivato o immagazzinato, si osserva infatti una maggiore tendenza al consumo di semi teneri e piccoli, come il miglio, rispetto a semi duri e grandi, come il grano. In ogni caso, è fondamentale prendere in considerazione i semi danneggiati nel complesso, senza fare distinzioni tra danni totali o parziali, poiché ciò li rende inutilizzabili per l'agricoltura e, di conseguenza, per fini alimentari, determinando una riduzione della produttività agricola. Ad incrementare il rischio contribuisce l'impatto del riscaldamento globale, che influisce sul metabolismo, sulla riproduzione e sui tassi di consumo delle specie non autoctone, oltre che sulla loro distribuzione spaziale. Ciò significa che

necessitano di più energia per sostenere la loro attività metabolica e questo si traduce in un maggior consumo alimentare. Inoltre, è stato dimostrato un incremento nell'entità del danno ai semi più grandi e duri (grano) in risposta all'aumento delle temperature, il che suggerisce che temperature più alte accentueranno le possibili conseguenze negative di *A. domesticus* sul settore agricolo. Per di più, in presenza di una sovrabbondanza di semi disponibili, il danno non si limiterà a qualche seme interamente consumato, ma si tradurrà nel parziale consumo di innumerevoli quantità, a significare un diverso approccio alimentare che potrebbe aumentare l'impatto complessivo. Un'ulteriore conseguenza negativa al riscaldamento globale è una possibile espansione del suo habitat verso nord, in quanto il range di temperature ottimali per il suo sviluppo è tra i 26 e i 34°C, provocando danni peggiori agli ecosistemi nativi e all'agricoltura. I cambiamenti climatici, dunque, non solo influenzano la produttività agricola in Europa, ma anche la proliferazione di popolazioni invasive di *A. domesticus*, le quali complicherebbero ulteriormente la situazione nutrendosi della scarsa vegetazione ed entrando in competizione con le specie autoctone.

3.2 Impatto sulle comunità native di insetti

A. domesticus, essendo originariamente una specie asiatica o africana, può essere classificata come una specie invasiva in Europa, dove è largamente diffusa nelle zone urbane (6). Le specie invasive causano considerevoli danni all'ambiente, all'economia e alla salute umana, e il loro radicamento nell'ecosistema rende complicata la loro gestione, poiché interagiscono sia con le specie native che con altre specie invasive. Gli impatti sulla biodiversità possono essere sia diretti, derivanti dall'alimentazione erbivora o predatrice o dall'ibridazione con specie autoctone, che indiretti, causati dalla trasmissione di malattie o dalla competizione per le risorse (4).

Una prospettiva attuale si basa sull'allevamento di insetti al fine di mitigare gli impatti ecologici derivanti dalla loro raccolta in natura, nonché di fornire

alternative nel caso di una diminuzione della popolazione di insetti commestibili a causa dei cambiamenti globali. Tuttavia, l'implementazione di allevamenti di insetti su vasta scala solleva una serie di sfide etiche, scientifiche, economiche e sanitarie, a causa del rischio del loro rilascio accidentale in natura (4).

Analizzando tali sfide, emerge il problema degli effetti che le specie esotiche possono avere sulle specie native quando condividono una risorsa comune, e in particolare si evidenzia l'instaurazione tra esse di un'interazione di tipo competitivo oppure facilitativo. Questo significa che, sebbene tradizionalmente si sia pensato che la competizione tra specie di insetti fitofagi fosse il principale fattore che influenzasse la struttura delle comunità di insetti, emergono nuove evidenze che indicano il contributo di altri tipi di interazioni interspecifiche nella determinazione di tale struttura. Solitamente nella competizione per una risorsa tra specie diverse sono tre i parametri che stabiliscono quale specie prevarrà nell'utilizzo delle risorse: tasso di crescita, tasso di mortalità e semi-saturazione, ovvero il punto critico in cui il tasso di crescita della specie è al 50% del suo massimo potenziale in relazione alla disponibilità delle risorse. Si osserva una tendenza alla predominanza delle specie esotiche invasive sulle specie autoctone, con il conseguente spostamento di queste ultime verso altri habitat. Inoltre, è fondamentale sottolineare che diversi fattori antropici sono causa di gran parte delle invasioni biologiche, soprattutto per quanto riguarda il commercio globale che comporta il trasporto involontario di insetti non autoctoni (4).

In base alle attuali circostanze legate ai cambiamenti globali, diventa quindi di fondamentale importanza prevedere se specie esotiche potrebbero predominare su specie autoctone, specialmente nel caso in cui potrebbero causarne lo spostamento o addirittura l'estinzione, con l'effetto finale di una differente distribuzione delle specie (4).

4. CONCLUSIONI E PROSPETTIVE FUTURE

Affinché l'idea di allevare insetti commestibili possa davvero rappresentare una strategia sostenibile vincente per soddisfare la crescente domanda globale di proteine, sarà indispensabile sviluppare un sistema di allevamento intensivo su larga scala. Solo a quel punto sarà possibile valutare con precisione l'effettivo impatto ambientale di questo settore. Anche se è stato dimostrato che gli insetti offrono diversi vantaggi rispetto ai tradizionali sistemi di allevamento, ciò non implica necessariamente che il loro allevamento sarà rispettoso per l'ambiente. È quindi fondamentale, durante l'attuale fase di nascita del settore, avviare discussioni critiche sulla sua sostenibilità e promuovere la ricerca necessaria per individuare i fattori determinanti del suo impatto ambientale. Altrimenti, c'è il rischio di creare un'industria che, anziché risolvere un problema ambientale, ne generi un altro (7).

Le specie di insetti sono caratterizzate da diverse esigenze alimentari e abitative nel loro ciclo di vita naturale, mentre l'ubicazione dell'industria influisce sulle modalità di alloggio degli insetti, sulle varietà di colture alimentari disponibili e sul rischio di rilascio accidentale. È importante tenere in considerazione il pericolo che gli insetti allevati possano diventare invasivi nel territorio locale, in quanto potrebbero comportare serie implicazioni all'ecosistema e alla produzione. In particolare, si dovrebbe prestare maggiore attenzione alle specie non autoctone, specialmente considerando che il cambiamento climatico aumenta la probabilità del loro insediamento e della loro diffusione (7). Sarebbe opportuno effettuare delle ricerche mirate a identificare specie di insetti autoctoni che possano essere impiegate in maniera efficiente per la produzione alimentare, anziché optare per specie esotiche (4).

Solitamente, quando si valuta l'impatto ambientale dell'industria, si attribuisce importanza al ruolo di fattori come l'alloggiamento degli animali, il processo di

lavorazione e il trasporto delle risorse. Tuttavia, è essenziale considerare anche il ruolo degli ecologi, che studiano come l'ecologia degli organismi interagisca con questi fattori chiave del sistema di produzione. Perciò, gli ecologi dovrebbero valutare e divulgare informazioni riguardanti questo settore, al fine di assicurare che le sfide legate alla sostenibilità ambientale siano prese in considerazione. Dato che l'industria si focalizza su un limitato numero di potenziali specie di insetti commestibili, un ambito su cui gli ecologi potrebbero lavorare è l'identificazione di altre specie che possiedano caratteristiche ideali per l'allevamento di massa, per poi analizzarne il profilo di crescita. Inoltre, parallelamente a questa ricerca ecologica sulle specie di insetti adatte alla domesticazione, dovrebbe essere condotta anche la ricerca sul profilo nutrizionale e sulla sicurezza alimentare, per valutare non solo il valore proteico ma anche la sostenibilità del settore. Infine, gli ecologi potrebbero introdurre negli allevamenti su scala industriale dei sistemi di valutazione del rischio relativi all'ecologia e alla gestione delle specie invasive, comprendendo strategie per il loro controllo e, se necessario, per la loro rimozione. Tale approccio richiede un'analisi dettagliata per ogni specie coinvolta, che però non è ancora stata compiuta (7).

In conclusione, è necessario che gli scienziati conducano una ricerca accurata che affianchi lo sviluppo di questa innovativa industria sostenibile, la quale rappresenta una grande opportunità per garantire il nutrimento della futura popolazione mondiale senza arrecare ulteriori danni all'ambiente da cui dipendiamo (7).

5. BIBLIOGRAFIA

1. Population Matters. [Online] [Consultato: 3 maggio 2024.] <https://populationmatters.org/>.
2. *The role of edible insects to mitigate challenges for sustainability.* **Guiné, R.; Correia, P.; Coelho, C.; Costa, C.** 2021, *Open Agriculture*, Vol. 6, p. 24-36.
3. *Reducing the global environmental impact of livestock production: the minilivestock option.* **Tabassum, -A.; Abbasi, T.; Abbasi, S.A.** 2016, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 112, p. 1754-1766.
4. *Impact of invasive insects on native insect communities.* **Fortuna, T.M.; Le Gall, P.; Mezdour, S.; Calatayud, P.A.** 2022, *Current Opinion in Insect Science*, Vol. 51, art.no. 100904.
5. *Industrial rearing of edible insects could be a major source of new biological invasions.* **Bang, A.; Courchamp, F.** 2020, *Ecology Letters*, Vol. 24, p. 393-397.
6. *Assessing the potential phytosanitary threat of the house cricket Acheta domesticus.* **Kulesa, A.K.; Balzani, P.; Soto, I.; Toutain, M.; Haubrock, P.J.; Kouba, A.** 2024, *Science of The Total Environment*, Vol. 917, art.no. 170376.
7. *Approaching Ecological Sustainability in the Emerging Insects-as-Food Industry.* **Berggren, Å.; Jansson, A.; Low, M.** 2019, *Trends in Ecology & Evolution*, Vol. 34, p. 132-138.
8. *Potential of Insects as Food and Feed in Assuring Food Security.* **van Huis, A.** 2013, *Annual Review of Entomology*, Vol. 58, p. 563-583.
9. *The Potential Impacts by the Invasion of Insects Reared to Feed Livestock and Pet Animals in Europe and Other Regions: A Critical Review.* **Lourenço, F.; Calado, R.; Medina, I.; Ameixa, O.M.C.C.** 2022, *Sustainability*, Vol. 14, art.no. 6361.