DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE ALIMENTARI E AMBIENTALI

CORSO DI LAUREA IN: SCIENZE E TECNOLOGIE AGRARIE

PRODUZIONE DI BIOGAS DA FRASS

Biogas Production from Frass

TIPO TESI: compilativa

Studente:
DANIELE TORIELLO

Relatore:
DOTT. ALESSIO ILARI

Correlatore:
PROF. ESTER FOPPA PEDRETTI

ANNO ACCADEMICO 2025-2026

Dedico questo traguardo ai miei genitori. Mi avete insegnato ad affrontare a testa alta la vita e a credere che, con impegno e forza di volontà, si possa raggiungere qualsiasi obiettivo. Grazie per aver creduto in me e per essermi stati accanto in ogni momento. Ai miei fratelli, Filippo ed Emanuele, i miei due grandi punti di riferimento: grazie per il vostro sostegno e per esserci sempre stati. Ad Alessio e Mattia, con cui ho condiviso questi splendidi anni: grazie per aver reso questo percorso piacevole e ricco di momenti che non dimenticherò mai. Ringrazio, infine, tutte le persone con cui ho attraversato questi anni. Ognuna, a modo suo, ha contribuito a rendermi la persona che sono oggi.

SOMMARIO

SOMMARIO 3

ELENCO DELLE TABELLE 5

ELENCO DELLE FIGURE 6

INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI 7

CAPITOLO 1 IL FRASS NELL'ALLEVAMENTO DI INSETTI: ORIGINE, COMPOSIZIONE E SPECIE DI INTERESSE 9

1.1 Definizione e origine del Frass 9

1.1.1 Composizione del frass e fattori che ne influenzano le caratteristiche 10

1.2 Principali specie allevate e motivi della scelta 14

1.2.1 Hermetia illucens 14

1.2.2 Tenebrio molitor 15

1.2.3 Acheta domesticus 16

1.3 Vie di valorizzazione del frass 18

1.3.1 Valorizzazione agronomica ed energetica 18

CAPITOLO 2 DIGESTIONE ANAEROBICA E PRODUZIONE DI BIOGAS: PRINCIPI GENERALI E PARAMETRI DI PROCESSO 20

2.1 Principi generali della digestione anaerobica 20

2.1.1 Fasi del processo anaerobico 20

2.2 Composizione del biogas 21

2.2.1 Metano, anidride carbonica e altri componenti 22

2.3 Fattori che influenzano la resa in metano 22

2.3.1 pH, temperatura, rapporto C/N e solidi volatili 23

CAPITOLO 3 PRODUZIONE DI BIOGAS DA FRASS: POTENZIALE, SPECIE CONSIDERATE E PROSPETTIVE APPLICATIVE 25

3.1 Potenziale del frass come substrato per la digestione anaerobica 25

3.1.1 Rese in metano e confronto con altri residui organici 27

3.2 Frass da Hermetia illucens e Tenebrio molitor 29

3.2.1 Confronto tra specie e variabilità del substrato 33

3.3 Frass da Acheta domesticus 34
3.3.1 Stato della letteratura e limiti degli studi disponibili 36
3.4 Opportunità, criticità e prospettive 36
3.4.1 Integrazione con economia circolare e agroenergie 38
CONCLUSIONI 40
BIBLIOGRAFIA 42

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 1-1: Composizione media e intervalli di variazione del frass di Acheta domesticus, Tenebrio molitor e Hermetia illucens. Fonte: elaborazione propria su dati tratti da [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11] 11

Tabella 1-2: Variabilità dei principali parametri fisico-chimici del frass di Hermetia illucens. 12

Tabella 1-3: Principali parametri fisico-chimici del frass di Tenebrio molitor. 13

Tabella 1-4: Principali parametri fisico-chimici del frass di cricket (Gryllus spp.). 13

Tabella 2-1: Principali fasi della digestione anaerobica e relative caratteristiche. Fonte: elaborazione propria su dati tratti da [19] 21

Tabella 2-2: Principali parametri della digestione anaerobica e relative condizioni di riferimento. Fonte: elaborazione propria su dati tratti da [4], [5], [19] 24

Tabella 3-1: Principali caratteristiche del frass rilevanti per il suo impiego come substrato nella digestione anaerobica. Fonte: elaborazione propria su dati tratti da [2] 26

Tabella 3-2: Confronto tra le rese specifiche di metano del frass e di alcune biomasse organiche convenzionali. Fonte: elaborazione propria su dati tratti da [2], [4], [5] 27

Tabella 3-3: Principali caratteristiche del frass di Acheta domesticus e valori energetici disponibili per residui di grilli (Gryllus spp.). Fonte: elaborazione propria su dati tratti da[11], [12] 35

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1-1: Ciclo biologico di Hermetia illucens. Fonte: tratto da[13] 15
Figura 1-2: Ciclo biologico di Tenebrio molitor. Fonte: tratto da[13] 16
Figura 1-3: Ciclo biologico di Acheta domesticus a 30 °C. Fonte: tratto da [17] 17
Figura 3-1: Produzione cumulativa di metano ottenuta dalla digestione anaerobica del frass di Tenebrio Molitor (A) e Hermetia Illucens (B). Fonte: tratto da [4] 28
Figura 3-2: Andamento della produzione cumulativa di biogas del frass di Tenebrio molitor (A) e Hermetia illucens (B) ottenuto da differenti substrati di allevamento. Fonte: elaborazione propria su dati tratti da [7] 31
Figura 3-3: Benefici della digestione anaerobica nella gestione circolare delle biomasse. Fonte: tratto da [1] 39

INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI

Le emissioni di carbonio e il riscaldamento globale rappresentano problematiche ambientali rilevanti, legate in larga parte all'impiego di combustibili fossili e alla gestione non adeguata dei rifiuti organici. In questo contesto, la produzione di energia da fonti rinnovabili rappresenta una strategia utile per ridurre la dipendenza dalle fonti fossili e contribuire agli obiettivi di sostenibilità ambientale. Tra le tecnologie disponibili, la digestione anaerobica costituisce una soluzione interessante, poiché consente di valorizzare biomasse e residui organici producendo biogas e, allo stesso tempo, contribuendo alla gestione dei rifiuti. Il processo permette inoltre di ottenere digestato, utilizzabile come biofertilizzante, favorendo il recupero di nutrienti nel sistema agricolo e l'integrazione con i principi dell'economia circolare. [1], [2]

Parallelamente, l'allevamento di insetti sta ricevendo crescente attenzione come possibile strategia per la valorizzazione di sottoprodotti agroalimentari. Tra le specie di maggiore interesse rientra *Hermetia illucens*, nota come mosca soldato nera, le cui larve sono in grado di convertire residui organici e sottoprodotti agroalimentari in biomassa ricca di proteine e lipidi, utilizzabile nel settore mangimistico. In questo modo, l'allevamento di insetti può contribuire alla valorizzazione di materiali residuali, generando biomassa utile e riducendo la quantità di sottoprodotti destinati allo smaltimento. [3]

L'allevamento di insetti genera però anche un sottoprodotto organico noto come frass. Il frass è generalmente costituito da deiezioni degli insetti, residui del substrato alimentare e resti dell'esoscheletro, e rappresenta uno dei principali sottoprodotti dell'insect farming. Attualmente, il suo impiego principale riguarda l'uso agronomico come fertilizzante o ammendante organico, grazie alla presenza di sostanza organica e nutrienti. Tuttavia, oltre alla valorizzazione agronomica, il frass può essere valutato anche come biomassa destinata alla produzione di bioenergia tramite digestione anaerobica. [2]

Studi recenti hanno evidenziato che il frass possiede un potenziale interessante come substrato per la produzione di biogas e biometano. In particolare, analisi condotte su campioni provenienti da aziende europee di allevamento di insetti hanno mostrato rese di metano comprese tra 0,3196 e 0,372 m^3 CH_4/kg VS, con concentrazioni di metano nel biogas comprese

tra 61,9% e 65,0%. Tali valori risultano comparabili a quelli di substrati tradizionali, come letami e residui colturali. Inoltre, sono state osservate differenze tra le specie considerate: il frass di *Tenebrio molitor* tende a mostrare un rilascio di metano più rapido ma meno stabile, mentre quello di *Hermetia illucens* presenta una degradazione più graduale e stabile. [4]

Alla luce di queste considerazioni, la presente tesi ha lo scopo di analizzare, attraverso una ricerca bibliografica, il potenziale del frass derivante dall'allevamento di insetti come substrato per la produzione di biogas e biometano. In particolare, l'elaborato prende in esame le caratteristiche generali del frass, i principi della digestione anaerobica e le principali evidenze scientifiche disponibili relative al suo potenziale metanigeno. L'attenzione viene rivolta soprattutto a specie di interesse per l'allevamento, quali *Hermetia illucens*, *Tenebrio molitor* e *Acheta domesticus*, evidenziando opportunità, limiti e prospettive di impiego del frass nell'ambito delle agroenergie e dell'economia circolare.

Capitolo 1
IL FRASS NELL'ALLEVAMENTO DI INSETTI: ORIGINE, COMPOSIZIONE E SPECIE DI INTERESSE

1.1 **Definizione e origine del Frass**

Il frass è un materiale organico residuale generato durante l'allevamento degli insetti per la produzione di biomassa destinata principalmente ai settori alimentare e mangimistico. Il termine deriva dal tedesco *Fraß*, riferito originariamente all'alimentazione degli animali, ed è stato successivamente utilizzato per indicare i residui associati all'attività alimentare degli insetti. Nell'ambito dell'insect farming, il termine non identifica quindi esclusivamente le deiezioni, ma un materiale più complesso che si forma durante l'intero processo di allevamento. [2]

Durante la crescita, gli insetti utilizzano il substrato alimentare trasformandone solo una parte in biomassa di scarto. Al termine del ciclo produttivo rimangono quindi le deiezioni prodotte dagli insetti, una quota di alimento non consumato o non completamente trasformato e residui derivanti dallo sviluppo degli insetti, come frammenti dell'esoscheletro (esuvie). Questi materiali vengono raccolti come residuo dell'allevamento, generalmente dopo la separazione della biomassa larvale destinata agli impieghi produttivi. Nel caso di *Hermetia illucens*, ad esempio, prima della fase pupale le larve vengono separate meccanicamente dai residui alimentari e dalle deiezioni rimaste nel sistema di allevamento. [2], [5]

La natura del frass può pertanto variare in relazione alla specie allevata, al substrato utilizzato e alle modalità di gestione e separazione adottate nell'allevamento. In letteratura vengono infatti analizzati materiali differenti: in alcuni casi esclusivamente le deiezioni, mentre in altri casi miscele costituite da feci, residui alimentari e resti degli insetti. Anche l'aspetto fisico può cambiare, assumendo ad esempio una forma più polverulenta o pellettata in funzione della specie e del sistema produttivo. [2]

Anche dal punto di vista normativo il frass viene considerato una matrice composita e non una semplice escrezione animale, poiché può comprendere escreti degli insetti allevati, substrato alimentare e parti degli insetti presenti nel residuo. Questa definizione evidenzia come le caratteristiche del materiale siano direttamente collegate al processo dal quale esso deriva. [2]

Da questa origine eterogenea deriva una composizione chimico-fisica variabile, che deve essere caratterizzata prima di individuare le possibili modalità di valorizzazione del materiale.

1.1.1 *Composizione del frass e fattori che ne influenzano le caratteristiche*

La composizione del frass può presentare una notevole variabilità in funzione della specie di insetto allevata, del substrato alimentare impiegato e delle condizioni adottate durante il ciclo produttivo. Di conseguenza, il frass non può essere considerato una matrice con caratteristiche costanti, ma necessita di una caratterizzazione chimico-fisica specifica ai fini della sua successiva valorizzazione.

Tra i principali parametri utilizzati per la caratterizzazione del frass rientrano il contenuto di umidità e di solidi totali (TS), i solidi volatili (VS), il pH, il contenuto di carbonio e azoto e il rapporto C/N. A questi si aggiunge la composizione biochimica, con particolare riferimento al contenuto di proteine, lipidi e alle principali frazioni fibrose, quali cellulosa, emicellulosa e lignina. La letteratura evidenzia tuttavia differenze sia nei parametri analizzati sia nelle metodologie utilizzate per la loro determinazione; pertanto, il confronto tra studi richiede l'impiego di dati espressi su basi omogenee e direttamente confrontabili. [2]

Al fine di fornire un quadro generale della composizione del frass delle specie considerate nella presente tesi, sono stati raccolti e confrontati i dati disponibili per *Hermetia illucens*, *Tenebrio molitor* e *Acheta domesticus*. Per ciascun parametro sono stati considerati esclusivamente dati espressi su basi confrontabili. I valori medi e gli intervalli riportati derivano dall'elaborazione dei dati disponibili nei diversi studi considerati. I risultati sono riportati in Tabella 1-1.

Tabella 1-1: Composizione media e intervalli di variazione del frass di Acheta domesticus, Tenebrio molitor e Hermetia illucens. Fonte: elaborazione propria su dati tratti da [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11]

Parametro	Unità di misura	Valore medio tra gli studi	Intervallo tra gli studi
Umidità	% Peso fresco	25,2	9,6–45,9
Solidi totali (TS)	% Peso fresco	74,8	54,1–90,4
Solidi volatili (VS)	% TS	84,3	65,4–90,4
pH	-	6,5	5,7–7,0
Carbonio Totale	% TS	45,5	37,7–52,5
Azoto Totale	% TS	3,7	2,3–7,3
Rapporto C/N	-	13,9	7,4–21,1
Proteine	% TS	19,1	17,9–20,8
Lipidi	% TS	2,6	2,0–3,5
Cellulosa	% TS	15,7	9,1–22,2
Emicellulosa	% TS	13,8	1,9–25,7
Lignina (ADL)	% TS	12,8	8,8–14,9

La sintesi dei dati evidenzia un contenuto medio di umidità pari al 25,2% sul peso fresco, con valori compresi tra il 9,6 e il 45,9%. Di conseguenza, il contenuto medio di solidi totali risulta pari al 74,8% sul peso fresco. I solidi volatili rappresentano mediamente l'84,3% dei TS, indicando una consistente presenza di sostanza organica nella matrice. Il pH presenta un valore medio pari a 6,5, mentre il carbonio e l'azoto totali raggiungono rispettivamente valori medi del 45,5% e del 3,7% dei TS, con un rapporto C/N medio pari a 13,9.

Per quanto riguarda la composizione biochimica, il contenuto medio di proteine è risultato pari al 19,1% dei TS, mentre i lipidi rappresentano mediamente il 2,6%. Le frazioni fibrose mostrano valori medi del 15,7% per la cellulosa, del 13,8% per l'emicellulosa e del 12,8% per la lignina. Gli intervalli riportati in Tabella 1-1 mostrano tuttavia una variabilità rilevante per diversi parametri, confermando come la composizione del frass possa differire sensibilmente tra i materiali analizzati nei diversi studi. I valori medi riportati devono pertanto essere considerati come indicativi di un quadro compositivo generale e non come valori rappresentativi assoluti del frass, poiché derivano dall'aggregazione di matrici provenienti da specie, substrati alimentari e condizioni di trattamento differenti.

Un esempio delle differenze legate alla specie allevata è fornito da Dal Magro et al., che hanno confrontato il frass di *T. molitor* con quello di *H. illucens*. Il contenuto di solidi totali è

risultato pari rispettivamente all'86,69% e al 48,32% sul peso fresco, mentre i solidi volatili rappresentavano l'82,12% e l'89,92% dei TS. Differenze sono state riscontrate anche nelle frazioni fibrose: il frass di *T. molitor* presentava il 30,42% di emicellulosa, il 17,76% di cellulosa e il 5,98% di lignina, mentre per *H. illucens* i corrispondenti valori erano pari al 20,89%, 26,69% e 11,61% dei TS. [7]

Oltre alla specie, anche la composizione del substrato alimentare può contribuire alle differenze osservate, poiché una parte del materiale non utilizzato dagli insetti permane nel residuo finale. La dieta può pertanto modificare la quantità e la natura della sostanza organica e delle componenti fibrose presenti nel frass. Tale variabilità rende necessaria la caratterizzazione del materiale prima della sua utilizzazione, soprattutto quando il frass è destinato a processi biologici nei quali la composizione della matrice condiziona la degradabilità della sostanza organica. [6], [7]

Per approfondire la variabilità dei principali parametri fisico-chimici del frass, i dati riportati nella review di Dal Magro et al. [2] e nella fonte primaria di Bulak et al. [12] sono stati analizzati separatamente in funzione della specie considerata. In particolare, sono stati presi in esame il contenuto di solidi totali (TS), l'umidità, ricavata per differenza rispetto ai TS, e il contenuto di solidi volatili (VS). Tale distinzione consente di evidenziare le differenze tra specie e, quando sono disponibili più osservazioni, la variabilità presente anche all'interno della stessa specie in relazione al substrato alimentare e agli eventuali trattamenti applicati al frass.

Tabella 1-2: Variabilità dei principali parametri fisico-chimici del frass di Hermetia illucens.

Parametro	Unità di misura	Minimo	Massimo
Solidi Totali (TS)	% peso fresco	2,6	84,1
Umidità*	% peso fresco	15,9	97,4
Solidi Volatili (VS)	% TS	51,2	94,5

Umidità calcolata come differenza tra 100 e il contenuto di solidi totali (TS). Fonte: elaborazione propria su dati tratti da [2]

Tabella 1-3: Principali parametri fisico-chimici del frass di Tenebrio molitor.

Parametro	Unità di misura	Valore riportato
Solidi totali (TS)	% peso fresco	89,4
Umidità*	% peso fresco	10,6
Solidi volatili (VS)	% TS	84,0

Umidità calcolata come differenza tra 100 e il contenuto di solidi totali (TS). Fonte: elaborazione propria su dati tratti da [12]

Tabella 1-4: Principali parametri fisico-chimici del frass di cricket (Gryllus spp.).

Parametro	Unità di misura	Valore riportato
Solidi totali (TS)	% peso fresco	87,3
Umidità*	% peso fresco	12,7
Solidi volatili (VS)	% TS	87,1

Umidità calcolata come differenza tra 100 e il contenuto di solidi totali (TS). Fonte: elaborazione propria su dati tratti da [12]

I dati riportati nelle Tabelle 1-2, 1-3 e 1-4 evidenziano come le caratteristiche fisico-chimiche del frass possano presentare una notevole variabilità. Tale variabilità risulta particolarmente evidente nel caso di *Hermetia illucens*, per la quale il contenuto di solidi totali varia dal 2,6 all'84,1% sul peso fresco, corrispondente a un contenuto di umidità compreso tra il 97,4 e il 15,9%. Anche i solidi volatili mostrano un intervallo ampio, compreso tra il 51,2 e il 94,5% dei TS. Questi valori mostrano come, anche all'interno della stessa specie, la composizione del frass possa cambiare sensibilmente in relazione al substrato alimentare utilizzato e agli eventuali trattamenti applicati al materiale. [2]

Per *Tenebrio molitor* e per i grilli del genere *Gryllus*, invece, nella review è disponibile una sola osservazione per ciascun gruppo. I valori riportati nelle Tabelle 1-3 e 1-4 devono pertanto essere considerati indicativi e non consentono di descrivere un intervallo di variabilità analogo a quello disponibile per *H. illucens*. Nel complesso, questi dati confermano la necessità di interpretare con cautela valori medi generali riferiti al frass, poiché specie, alimentazione e trattamento del materiale possono influenzarne sensibilmente le caratteristiche. [2]

1.2 **Principali specie allevate e motivi della scelta**

Nell'allevamento di insetti vengono impiegate specie caratterizzate da differenti cicli biologici e modalità di gestione. Tra queste, *Hermetia illucens*, *Tenebrio molitor* e *Acheta domesticus* rivestono particolare interesse per la produzione di biomassa destinata principalmente ai settori alimentare e mangimistico. Durante il ciclo produttivo viene inoltre generato frass come materiale residuale.[2], [4]

Le tre specie presentano caratteristiche biologiche differenti. *Hermetia illucens* e *Tenebrio molitor* sono insetti olometaboli, il cui ciclo comprende gli stadi di uovo, larva, pupa e adulto. *Acheta domesticus* presenta invece uno sviluppo emimetabolo, caratterizzato dall'assenza dello stadio pupale e dalla presenza di forme giovanili, denominate ninfe, che attraverso successive mute raggiungono lo stadio adulto. [13], [14], [15]

La scelta di queste specie consente quindi di considerare sistemi differenti dal punto di vista biologico e gestionale. L'inquadramento tassonomico, il ciclo biologico e le principali caratteristiche produttive risultano utili per comprendere le condizioni nelle quali viene prodotto il frass associato a ciascuna specie.

1.2.1 *Hermetia illucens*

Hermetia illucens, comunemente conosciuta come mosca soldato nera o Black Soldier Fly (BSF), è un insetto appartenente all'ordine dei Diptera e alla famiglia Stratiomyidae. Originaria del continente americano, la specie è oggi diffusa a livello globale, soprattutto nelle regioni tropicali e più calde. Presenta uno sviluppo olometabolo, caratterizzato da metamorfosi completa e dalla successione degli stadi di uovo, larva, pupa e adulto. [13]

Le femmine depongono le uova in prossimità di materiale organico, generalmente all'interno di piccoli spazi asciutti e protetti. In condizioni di temperatura pari a circa 27 °C, la schiusa avviene dopo circa quattro giorni. La durata dello sviluppo larvale risulta invece più variabile e può essere influenzata dalla temperatura, dall'umidità e dalle caratteristiche del substrato alimentare. Al termine dello sviluppo la larva assume progressivamente una colorazione più scura e passa alla fase prepupale, seguita dalla pupa e successivamente dall'adulto. [13]

Dal punto di vista dell'allevamento, la fase larvale riveste particolare importanza produttiva. Le larve possono infatti crescere su differenti biomasse di origine agroalimentare e rappresentano lo stadio di maggiore interesse commerciale, soprattutto per la produzione di biomassa destinata al settore mangimistico. [3]

La gestione dell'intero ciclo richiede condizioni differenti per gli stadi larvali e per gli adulti. Negli allevamenti possono essere distinte una zona destinata alla crescita delle larve fino alla pupazione e una zona dedicata agli adulti, nella quale avvengono accoppiamento e ovideposizione. Per l'allevamento larvale sono riportate come idonee temperature ambientali comprese tra 25 e 30 °C, mentre un'umidità relativa intorno al 60% è comunemente utilizzata. Anche nella fase riproduttiva il controllo di temperatura, umidità e illuminazione assume particolare importanza per favorire l'accoppiamento e la deposizione delle uova. [13]

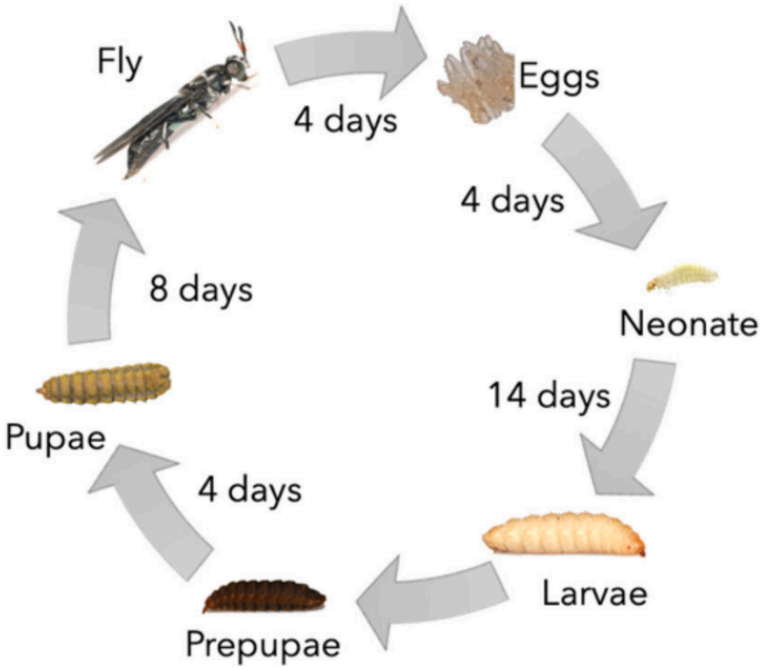


Figura 1-1: Ciclo biologico di Hermetia illucens. Fonte: tratto da[13]

1.2.2 *Tenebrio molitor*

Tenebrio molitor, comunemente noto come tarma della farina, è un insetto appartenente all'ordine dei Coleoptera e alla famiglia Tenebrionidae. La specie presenta uno sviluppo olometabolo e il ciclo biologico comprende quattro stadi distinti: uovo, larva, pupa e adulto. [13], [15]

La durata dei diversi stadi è influenzata dalle condizioni ambientali e di allevamento. A una temperatura di 25 °C, la schiusa delle uova avviene generalmente dopo 3–9 giorni. La fase larvale è la più lunga e può protrarsi per diversi mesi, mentre in condizioni ambientali e nutrizionali favorevoli può ridursi fino a circa nove settimane. Al termine dello sviluppo

larvale si forma la pupa, la cui durata è generalmente compresa tra 5 e 7 giorni, dalla quale emerge successivamente l'insetto adulto. [13]

Dal punto di vista produttivo, la fase larvale rappresenta lo stadio di maggiore interesse, poiché sono proprio le larve a essere raccolte negli allevamenti. La gestione può essere effettuata mediante cassette disposte su scaffalature o sistemi sovrapposti, mantenendo un'adeguata ventilazione e il controllo delle condizioni ambientali. Per l'allevamento viene comunemente mantenuta una temperatura media di almeno 25 °C, con valori di umidità relativa prossimi al 60%. [13]

L'alimentazione delle larve si basa prevalentemente su substrati secchi di origine cerealicola, tra cui la crusca di frumento, ai quali possono essere affiancate fonti di alimento umido per garantire un adeguato apporto di acqua. La struttura asciutta e granulare del substrato facilita inoltre il movimento delle larve e l'accesso all'alimento durante la crescita. [13]

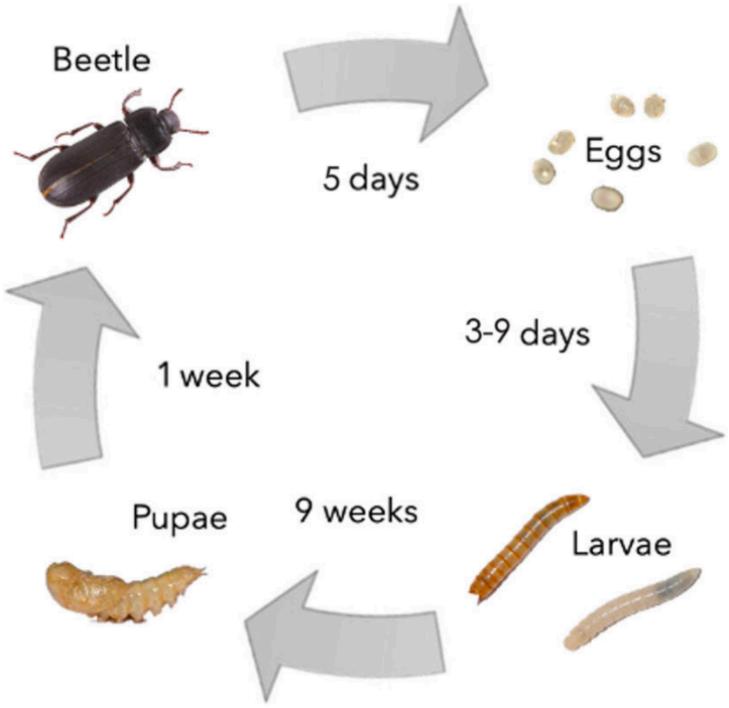


Figura 1-2: Ciclo biologico di Tenebrio molitor. Fonte: tratto da[13]

1.2.3 *Acheta domesticus*

Acheta domesticus, comunemente noto come grillo domestico, è un insetto appartenente all'ordine degli Orthoptera e alla famiglia Gryllidae. Presenta uno sviluppo emimetabolo,

caratterizzato da metamorfosi incompleta e dall'assenza dello stadio pupale. Il ciclo biologico comprende quindi gli stadi di uovo, ninfa e adulto. Le ninfe appena schiuse sono morfologicamente simili agli adulti, ma presentano dimensioni inferiori e sono prive di ali e di strutture genitali completamente sviluppate. Durante lo sviluppo attraversano successive mute fino al raggiungimento dello stadio adulto. [14], [16]

Dal punto di vista dell'allevamento, le uova vengono deposte e mantenute in un substrato umido fino alla schiusa. Le giovani ninfe vengono successivamente trasferite nelle unità di allevamento, dove proseguono lo sviluppo fino allo stadio adulto. Nei sistemi di produzione su larga scala possono essere utilizzati contenitori sovrapposti, mentre la raccolta viene generalmente effettuata in prossimità dell'ultima muta o una volta raggiunto lo stadio adulto. [14]

Le condizioni ambientali incidono sulla durata dello sviluppo. In condizioni di allevamento a 27 °C, con un'umidità relativa del 65% e un fotoperiodo di 14 ore di luce, è stato osservato l'inizio del passaggio delle ninfe allo stadio adulto dopo circa sette settimane. Il confronto tra temperature di 27 e 29 °C ha inoltre evidenziato differenze nei tempi di crescita e nella produzione di biomassa, mostrando l'importanza del controllo della temperatura durante l'allevamento. [16]

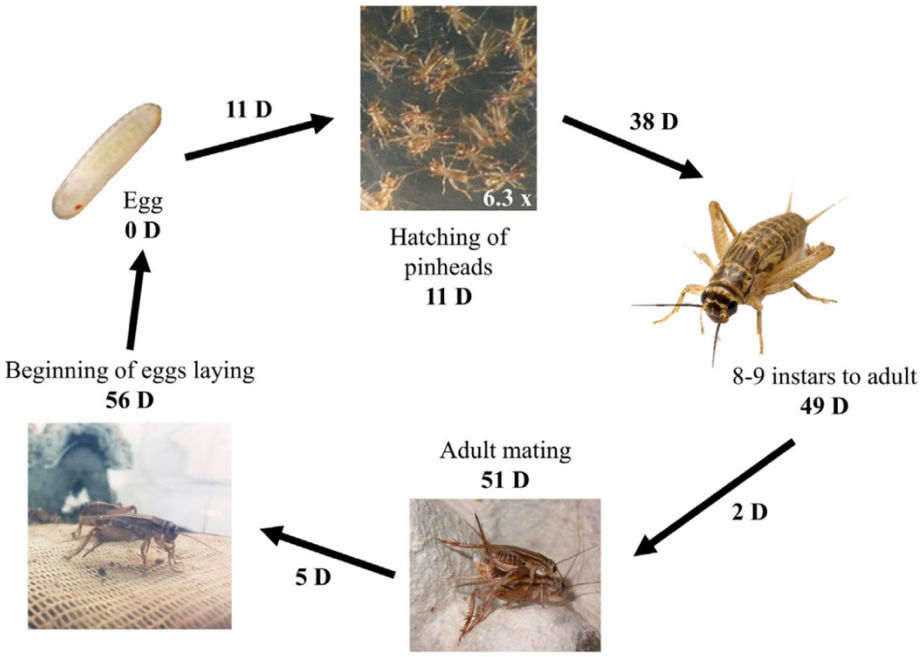


Figura 1-3: Ciclo biologico di Acheta domesticus a 30 °C. Fonte: tratto da [17]

1.3 **Vie di valorizzazione del frass**

Il frass, in quanto materiale residuale derivante dall'allevamento di insetti, può essere valorizzato attraverso differenti modalità. Le principali sono rappresentate dall'impiego agronomico, come fertilizzante organico o ammendante, e dalla valorizzazione energetica, mediante l'utilizzo della sostanza organica in processi di digestione anaerobica per la produzione di biogas. [2], [4]

Queste due possibilità consentono rispettivamente il recupero dei nutrienti contenuti nel frass e della sua componente organica a fini energetici, inserendosi in sistemi orientati al recupero e alla valorizzazione dei residui organici.[2], [4]

1.3.1 *Valorizzazione agronomica ed energetica*

L'impiego agronomico rappresenta attualmente la principale modalità di valorizzazione del frass. La presenza di sostanza organica e di elementi nutritivi ne permette l'utilizzo come fertilizzante organico o ammendante, con effetti che possono riguardare sia l'apporto di nutrienti sia le caratteristiche biologiche del suolo. In un'indagine condotta presso aziende europee di allevamento di insetti, il 75% delle imprese considerate utilizzava il frass esclusivamente come fertilizzante, mentre soltanto il 12,5% lo destinava al recupero energetico. [4]

L'impiego diretto come ammendante presenta tuttavia alcune criticità legate alle caratteristiche della matrice. Un primo aspetto riguarda il rapporto C/N, che può condizionare la disponibilità dell'azoto nel suolo. In uno studio su frass di *Hermetia illucens* sono stati rilevati valori di C/N pari a 18,2, 18,5 e 26,6 in funzione del substrato utilizzato per l'allevamento. Valori superiori a 20 possono determinare un rischio di immobilizzazione dell'azoto da parte dei microrganismi del suolo, riducendone temporaneamente la disponibilità per le piante. [6]

Anche il trattamento del frass e le modalità di applicazione possono influenzarne l'efficacia agronomica. In prove condotte su frumento con frass di *Acheta domesticus*, la germinazione ha raggiunto il 100% quando il frass sottoposto a trattamento termico veniva miscelato al substrato e quando il frass non trattato veniva applicato in maniera differita; al contrario, l'applicazione superficiale del frass trattato termicamente ha ridotto la germinazione al 60%. Lo stesso studio ha evidenziato che trattamento e modalità di applicazione influenzavano anche crescita e concentrazione di nutrienti nelle piante. [18] Questi risultati mostrano quindi

che l’utilizzo agronomico del frass richiede la definizione di modalità di trattamento e distribuzione adeguate alle condizioni di impiego.

Un’ulteriore criticità riguarda gli aspetti igienico-sanitari. Nel frass possono infatti essere presenti microrganismi potenzialmente indesiderati; in campioni analizzati in letteratura sono stati segnalati, tra gli altri, *Salmonella* spp., batteri appartenenti alle Xanthomonadaceae e *Bacillus cereus*. Il trattamento del materiale assume quindi importanza prima dell’impiego agronomico. La digestione anaerobica in condizioni termofile è stata indicata come una possibile modalità per ridurre il carico di patogeni e migliorare la qualità igienica del digestato ottenuto. [4]

Accanto all’impiego diretto come ammendante, il frass può quindi essere sottoposto a digestione anaerobica per il recupero della componente organica sotto forma di biogas. L’elevato contenuto di sostanza organica rende infatti questa matrice utilizzabile come substrato per la produzione energetica. Al termine del processo si ottiene inoltre il digestato, nel quale può essere mantenuta parte dei nutrienti originariamente presenti e che può essere successivamente destinato all’impiego agronomico. In questo modo, la valorizzazione energetica può precedere quella agronomica, consentendo il recupero di energia e il successivo utilizzo del materiale residuo. [2], [4]

La scelta tra impiego agronomico diretto e valorizzazione energetica deve quindi essere effettuata in funzione delle caratteristiche specifiche del frass, poiché composizione, contenuto di azoto, umidità e stato del materiale possono condizionarne l'idoneità alle differenti destinazioni.

Capitolo 2
DIGESTIONE ANAEROBICA E PRODUZIONE DI BIOGAS: PRINCIPI GENERALI E PARAMETRI DI PROCESSO

2.1 **Principi generali della digestione anaerobica**

La digestione anaerobica è un processo biologico mediante il quale la sostanza organica viene degradata in assenza di ossigeno grazie all'attività di differenti comunità microbiche. Il processo viene condotto all'interno di digestori, nei quali vengono mantenute condizioni idonee allo svolgimento delle trasformazioni biologiche della matrice organica. [1]

Le matrici utilizzabili nella digestione anaerobica possono avere origine diversa e comprendono, tra le altre, reflui zootecnici, residui agricoli, rifiuti alimentari e altri sottoprodotti organici. Tra le caratteristiche favorevoli di un substrato rientrano la presenza di una frazione organica biodegradabile e una disponibilità di macro e micronutrienti adeguata all'attività dei microrganismi coinvolti nel processo. [19]

Dalla digestione anaerobica si ottengono principalmente biogas e digestato. Il biogas costituisce il prodotto destinato alla valorizzazione energetica, mentre il digestato rappresenta il materiale residuo del processo e conserva una quota dei nutrienti presenti nella matrice iniziale, rendendone possibile il successivo recupero in ambito agricolo. La digestione anaerobica consente quindi di associare il trattamento delle biomasse organiche alla produzione di energia e al recupero dei nutrienti. [1], [19]

2.1.1 *Fasi del processo anaerobico*

La digestione anaerobica si sviluppa attraverso quattro principali fasi biologiche: idrolisi, acidogenesi, acetogenesi e metanogenesi. A ciascuna fase corrispondono differenti gruppi microbici, che intervengono in successione nella degradazione della sostanza organica e nella trasformazione dei prodotti intermedi fino alla formazione del metano. [1], [19]

Durante l'idrolisi, le molecole organiche complesse, come carboidrati, proteine e lipidi, vengono degradate in composti più semplici e solubili. Nel caso di substrati organici solidi, questa fase può rappresentare un passaggio limitante del processo. I prodotti ottenuti vengono successivamente utilizzati durante l'acidogenesi, nella quale i batteri acidogeni li trasformano principalmente in acidi grassi volatili, oltre a idrogeno e anidride carbonica. [19]

Nella fase di acetogenesi, una parte dei prodotti formati durante l'acidogenesi viene ulteriormente convertita principalmente in acetato, idrogeno e anidride carbonica. Questi composti possono quindi essere utilizzati nella metanogenesi, fase conclusiva del processo, durante la quale gli archea metanigeni producono metano. Le principali vie di formazione del metano utilizzano l'acetato oppure idrogeno e anidride carbonica. L'attività dei microrganismi coinvolti nelle diverse fasi deve rimanere equilibrata, poiché l'accumulo dei prodotti intermedi può influenzare la stabilità complessiva della digestione. [19]

Tabella 2-1: Principali fasi della digestione anaerobica e relative caratteristiche. Fonte: elaborazione propria su dati tratti da [19]

Fase	Gruppo microbico principale	Trasformazione e prodotti principali	Caratteristica
Idrolisi	Batteri idrolitici	Molecole organiche complesse → composti semplici e solubili	Può rappresentare la fase limitante con substrati organici solidi
Acidogenesi	Batteri acidogeni	Prodotti dell'idrolisi → acidi grassi volatili, H_2 e CO_2	Microrganismi a crescita relativamente rapida
Acetogenesi	Batteri acetogeni	Intermedi organici → acetato, H_2 e CO_2	Stretta interazione con i microrganismi metanigeni
Metanogenesi	Archea metanigeni	Acetato oppure H_2 e CO_2 → CH_4	Microrganismi a crescita relativamente lenta

2.2 **Composizione del biogas**

Il biogas è una miscela gassosa prodotta durante la digestione anaerobica della sostanza organica. È costituito principalmente da metano (CH_4) e anidride carbonica (CO_2), ai quali possono aggiungersi componenti presenti in quantità minori, tra cui idrogeno solforato (H_2S) e vapore acqueo. La composizione della miscela influenza la qualità del biogas e le possibilità della sua successiva valorizzazione energetica. [1]

2.2.1 *Metano, anidride carbonica e altri componenti*

Il metano (CH_4) rappresenta la componente del biogas di maggiore interesse dal punto di vista energetico. La sua presenza permette infatti di utilizzare il biogas come combustibile per la produzione di calore ed energia elettrica, anche attraverso sistemi di cogenerazione. Prima dell'utilizzo energetico può essere necessario sottoporre il gas a trattamenti di purificazione, in funzione della presenza di componenti indesiderati. [1]

L'anidride carbonica (CO_2) costituisce l'altra principale componente della miscela, ma non contribuisce direttamente al suo valore energetico. Quando il biogas viene destinato alla produzione di biometano, una parte rilevante della CO_2 viene rimossa mediante processi di upgrading, aumentando così la concentrazione relativa di metano. Le tecnologie impiegate per questo trattamento possono differire per consumi energetici, prestazioni e perdite di metano. [1]

Tra i componenti presenti in quantità minori rivestono particolare importanza l'idrogeno solforato (H_2S) e l'ammoniaca (NH_3). L'H_2S si forma in seguito all'attività microbica sui composti contenenti zolfo, mentre l'NH_3 deriva dalla biodegradazione dei composti azotati. La loro presenza è quindi influenzata anche dalla composizione della matrice sottoposta a digestione e può rendere necessari specifici trattamenti del gas prima del suo utilizzo. [19]

2.3 **Fattori che influenzano la resa in metano**

La resa in metano ottenibile mediante digestione anaerobica dipende sia dalle caratteristiche della matrice organica sia dalle condizioni operative del processo. La presenza di una frazione organica biodegradabile favorisce l'attività dei microrganismi e la conversione del substrato, mentre una limitata disponibilità di nutrienti o la presenza di componenti difficilmente degradabili può ridurre l'efficienza del processo. Anche le caratteristiche fisiche della matrice possono influenzare il contatto tra substrato e comunità microbiche e, di conseguenza, la degradazione della sostanza organica. [19]

Tra i principali fattori di processo rientrano il pH, la temperatura, il rapporto carbonio/azoto (C/N), il contenuto di solidi, il carico organico e il tempo di ritenzione. Il mantenimento di condizioni adeguate è necessario per garantire l'equilibrio tra le diverse comunità microbiche coinvolte nella digestione. Un carico organico eccessivo, ad esempio, può determinare l'accumulo di acidi grassi volatili, provocare una diminuzione del pH e limitare l'attività dei microrganismi metanigeni, con conseguente riduzione della produzione di metano. [19]

2.3.1 *pH, temperatura, rapporto C/N e solidi volatili*

Il pH influenza direttamente l'attività delle comunità microbiche coinvolte nella digestione anaerobica, in particolare quella dei microrganismi metanigeni. Condizioni prossime alla neutralità favoriscono la stabilità del processo; nella letteratura vengono generalmente riportati valori ottimali compresi tra 6,8 e 7,2, mentre la produzione di metano può comunque verificarsi in un intervallo più ampio, indicativamente compreso tra 5,5 e 8,5. Variazioni marcate del pH possono indicare squilibri del processo, ad esempio in seguito all'accumulo di acidi grassi volatili. [19]

Anche la temperatura condiziona la velocità delle reazioni biologiche e la composizione delle comunità microbiche. La digestione anaerobica può essere condotta in differenti intervalli termici; tra quelli maggiormente utilizzati rientrano le condizioni mesofile, con valori indicativamente compresi tra 30 e 40 °C, e quelle termofile, comprese tra 50 e 60 °C. Le condizioni mesofile presentano generalmente una maggiore stabilità e minori esigenze energetiche, mentre temperature termofile possono favorire velocità di degradazione più elevate, ma richiedono un controllo più accurato del processo. [19] La maggiore efficienza potenziale delle condizioni termofile è infatti accompagnata da una minore stabilità e da maggiori esigenze di controllo.

Il rapporto carbonio/azoto (C/N) esprime l'equilibrio tra due elementi essenziali per l'attività microbica. Un rapporto non equilibrato può limitare il processo: una disponibilità insufficiente di azoto può ostacolare la crescita microbica, mentre un eccesso può favorire fenomeni di accumulo dell'ammoniaca. Per la digestione anaerobica viene generalmente indicato un intervallo di C/N compreso tra 20 e 30, con un valore prossimo a 25 spesso riportato come favorevole alla crescita dei microrganismi anaerobi. Il valore ottimale può tuttavia variare in funzione delle caratteristiche del substrato utilizzato. [19]

I solidi volatili (VS) rappresentano la frazione organica della sostanza secca potenzialmente disponibile per la degradazione microbica e costituiscono quindi un parametro utile per valutare il contenuto organico di una matrice. Per questo motivo, le rese specifiche di metano vengono frequentemente espresse rispetto alla quantità di solidi volatili introdotta nel digestore, ad esempio in mL CH_4/g VS o m^3 CH_4/kg VS. [4], [5]

Tabella 2-2: Principali parametri della digestione anaerobica e relative condizioni di riferimento. Fonte: elaborazione propria su dati tratti da [4], [5], [19]

Parametro	Valore/Condizione di riferimento	Caratteristica principale
pH	6,8-7,2	Intervallo favorevole alla stabilità dell'attività microbica e alla produzione di metano
Temperatura	Mesofila: 30–40 °C; Termofila: 50–60 °C	Influenza velocità delle reazioni, attività microbica e stabilità del processo
Rapporto C/N	20–30; valore indicativo ottimale ≈ 25	Favorisce un'adeguata disponibilità di carbonio e azoto per i microrganismi
Solidi Volatili (VS)	Dipendenti dalle caratteristiche del substrato	Rappresentano la frazione organica della sostanza secca e sono utilizzati per esprimere la resa specifica di metano

Capitolo 3
PRODUZIONE DI BIOGAS DA FRASS: POTENZIALE, SPECIE CONSIDERATE E PROSPETTIVE APPLICATIVE

3.1 **Potenziale del frass come substrato per la digestione anaerobica**

Le caratteristiche compositive del frass descritte nel Capitolo 1 assumono particolare rilevanza quando il materiale viene considerato come possibile substrato per la digestione anaerobica. In questo caso, tra i principali parametri da valutare rientrano il contenuto di solidi totali (TS), la quota di solidi volatili (VS), il pH, il rapporto carbonio/azoto e la composizione biochimica. In particolare, i VS rappresentano la frazione organica dei solidi potenzialmente disponibile per la degradazione microbica e costituiscono quindi uno degli elementi principali per valutare l'interesse energetico della matrice. [2]

Gli studi nei quali il frass è stato caratterizzato in relazione alla digestione anaerobica mostrano una notevole variabilità del contenuto di solidi. Nella letteratura esaminata sono stati riportati valori di TS compresi indicativamente tra 2,6 e 87,9% sul peso fresco, mentre i VS variano da circa 51,2 a 95,2% dei TS. Questa ampiezza evidenzia che il frass non presenta una condizione fisica uniforme: alcuni materiali risultano molto umidi, mentre altri presentano un'elevata concentrazione di sostanza secca. La quota di VS risulta tuttavia elevata in numerosi campioni, indicando la presenza di una consistente frazione organica potenzialmente disponibile per il processo anaerobico. [2]

Il contenuto di solidi assume anche un'importanza pratica nella scelta e nella gestione del processo. In funzione dei TS, la digestione anaerobica viene generalmente distinta in wet digestion, quando il contenuto di solidi totali è inferiore al 15%, e dry digestion, quando è pari o superiore al 15%. Negli studi sul frass considerati in letteratura, la digestione è stata condotta prevalentemente in condizioni umide, anche per effetto dell'aggiunta dell'inoculo e dei rapporti substrato/inoculo adottati. Di conseguenza, materiali particolarmente secchi possono richiedere una diluizione o la miscelazione con altre matrici prima dell'introduzione nel digestore. [2]

Anche il pH dei frass analizzati risulta generalmente compatibile con il processo anaerobico. Nei diversi studi sono stati riportati valori compresi tra circa 6,0 e 8,2, quindi nella maggior parte dei casi prossimi alla neutralità. Questo rappresenta un elemento favorevole, poiché condizioni di pH eccessivamente acide o alcaline possono compromettere l'attività delle comunità microbiche coinvolte nella produzione di metano. [2]

Accanto a queste caratteristiche favorevoli, deve essere considerata la componente azotata del frass. La degradazione dei composti proteici durante la digestione può infatti determinare un aumento della concentrazione di ammonio. In prove di digestione del frass è stato osservato un incremento di NH_4-N e, in presenza di concentrazioni elevate, questo fenomeno può contribuire a rallentare il processo. Per tale motivo è stata proposta la co-digestione con substrati a minore contenuto di azoto o maggiormente ricchi di carboidrati, in modo da ottenere una miscela più equilibrata. [2], [5]

Tabella 3-1: Principali caratteristiche del frass rilevanti per il suo impiego come substrato nella digestione anaerobica. Fonte: elaborazione propria su dati tratti da [2]

Parametro	Valori osservati negli studi sul frass	Significato per la digestione anaerobica
Solidi totali (TS)	2,6–87,9% sul peso fresco	Definiscono la concentrazione del materiale e incidono sulla gestione del substrato
Solidi volatili (VS)	51,2–95,2% dei TS	Rappresentano la frazione organica potenzialmente degradabile
pH	6,0–8,2	Valori generalmente prossimi alla neutralità e compatibili con il processo
Tipologia di processo in base ai TS	Wet: <15% TS; Dry: ≥15% TS	Il contenuto di solidi orienta la configurazione del processo

Nel complesso, la presenza di una consistente frazione di solidi volatili e valori di pH generalmente compatibili con l'attività microbica sostengono l'impiego del frass come possibile substrato per la digestione anaerobica. L'ampia variabilità del contenuto di solidi e la possibile presenza di elevate quantità di composti azotati rendono tuttavia necessaria una caratterizzazione preliminare del materiale e, in alcuni casi, l'adozione di strategie di diluizione o co-digestione. La reale capacità del frass di produrre metano deve quindi essere verificata attraverso prove sperimentali di digestione, i cui risultati vengono analizzati nel paragrafo successivo.

3.1.1 *Rese in metano e confronto con altri residui organici*

La resa specifica in metano rappresenta il parametro principale per valutare l'effettivo potenziale energetico del frass nella digestione anaerobica. Le prove sperimentali disponibili mostrano valori dello stesso ordine di grandezza di quelli ottenuti con diverse matrici organiche convenzionalmente utilizzate negli impianti di biogas. In prove BMP condotte su differenti campioni di frass sono state, ad esempio, misurate rese comprese tra 201 e 287 mL CH_4/g VS. Nello stesso studio tali valori sono stati confrontati con quelli riportati per il letame bovino (110–275 mL CH_4/g VS), suino (180–360 mL CH_4/g VS) e avicolo (200–360 mL CH_4/g VS), evidenziando una sostanziale sovrapposizione degli intervalli di produzione. [5]

Risultati dello stesso ordine di grandezza sono stati ottenuti anche in prove condotte su campioni di frass provenienti da allevamenti europei. In questo caso la produzione cumulativa finale è risultata compresa tra 0,3196 e 0,3721 m^3 CH_4/kg VS, corrispondenti a circa 320–372 mL CH_4/g VS. [4] Tali valori possono essere confrontati con rese di biometano pari a 204 mL CH_4/g VS per il letame bovino da latte, 259 mL CH_4/g VS per il letame avicolo e 323 mL CH_4/g VS per il letame suino. Tra i residui agroindustriali sono stati invece riportati valori di circa 316 mL CH_4/g VS per i residui di birrificazione e 275,9 mL CH_4/g VS per residui di frutta e verdura. [2]

Il confronto quantitativo mostra quindi che il frass può raggiungere rese di metano comparabili a quelle delle biomasse zootecniche e di alcuni residui agroindustriali. L'intervallo di 201–287 mL CH_4/g VS si colloca, ad esempio, nello stesso ordine di grandezza del letame bovino e avicolo, mentre i valori di circa 320–372 mL CH_4/g VS osservati in altri campioni raggiungono o superano il valore riportato per il letame suino e per i residui di birrificazione. Il confronto tra studi deve comunque essere considerato indicativo, poiché le prove sono state condotte con matrici e protocolli sperimentali differenti.[2], [4], [5]

Tabella 3-2: Confronto tra le rese specifiche di metano del frass e di alcune biomasse organiche convenzionali. Fonte: elaborazione propria su dati tratti da [2], [4], [5]

Parametro	Resa di metano (mL CH_4/g VS)
Frass di Hermetia Illucens	201-287
Frass di *H. illucens* e *T. molitor* da allevamenti europei	320-372
Letame bovino da latte	204
Letame avicolo	259
Letame suino	323
Residui di birrificazione	316
Residui di frutta e verdura	275,9

Oltre al valore finale della resa, l'andamento della produzione cumulativa di metano nel tempo permette di valutare la velocità con cui il substrato viene degradato. La Figura 2 mostra le curve ottenute durante 35 giorni di digestione anaerobica di differenti campioni di frass.

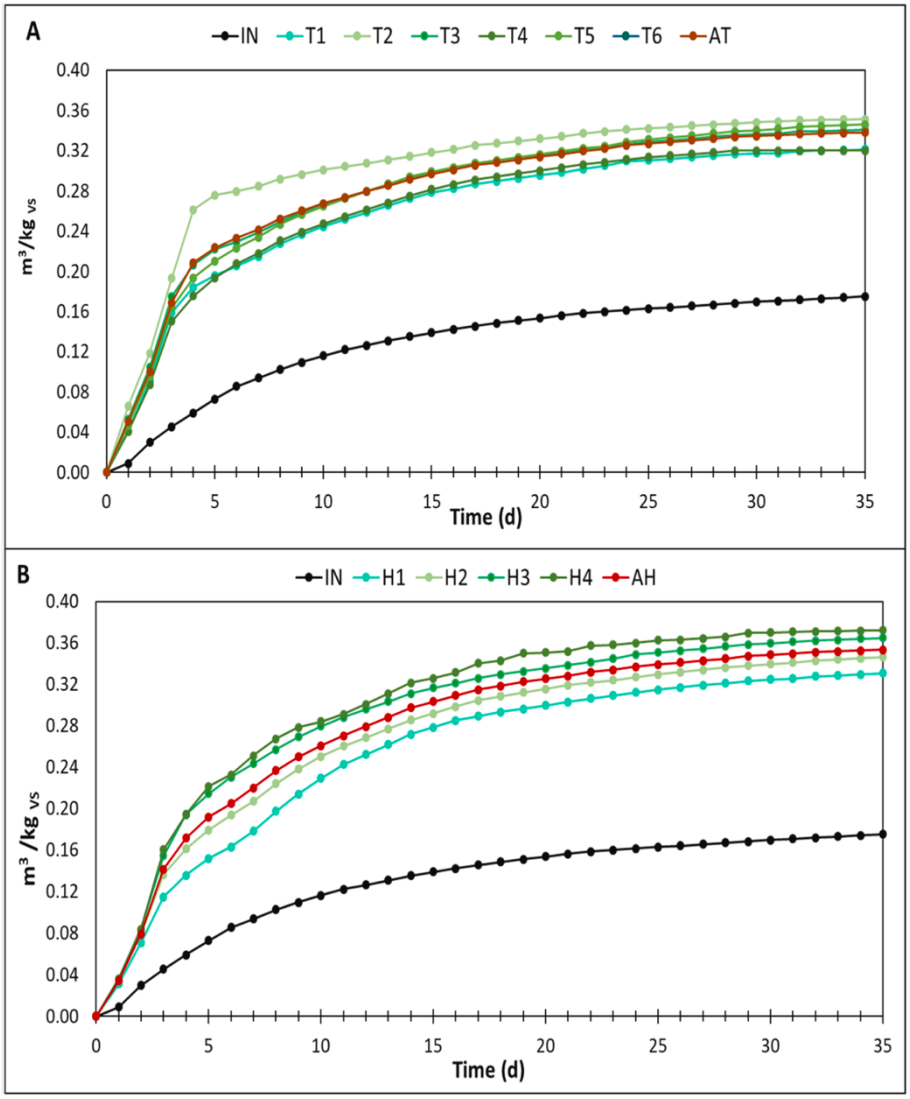


Figura 3-1: Produzione cumulativa di metano ottenuta dalla digestione anaerobica del frass di Tenebrio Molitor (A) e Hermetia Illucens (B). Fonte: tratto da [4]

Le curve mostrano un rapido aumento della produzione di metano durante la fase iniziale della digestione, seguito da un progressivo rallentamento fino al raggiungimento di un plateau. Nei campioni di *T. molitor* l'incremento più marcato si verifica tra il terzo e il quinto giorno, mentre dopo circa il settimo giorno la pendenza delle curve diminuisce sensibilmente. Questo

andamento indica che una parte consistente della frazione organica più facilmente degradabile viene convertita nelle prime fasi del processo. [4]

Nei campioni di *H. illucens* l'avvio della produzione risulta invece più graduale, con un incremento particolarmente evidente tra il terzo e l'ottavo giorno e un successivo rallentamento intorno al decimo giorno. Al termine della prova, le rese cumulative si collocano tra 0,3305 e 0,3721 m^3 CH_4/kg VS, mentre per *T. molitor* risultano comprese tra 0,3196 e 0,3512 m^3 CH_4/kg VS. Complessivamente, entrambe le tipologie mostrano una breve fase iniziale di latenza, una fase di più intensa metanogenesi e infine un progressivo avvicinamento al plateau. [4]

L'andamento delle curve conferma quindi che la valutazione del frass non deve basarsi soltanto sul valore finale di BMP, ma anche sulla velocità con cui il metano viene prodotto.

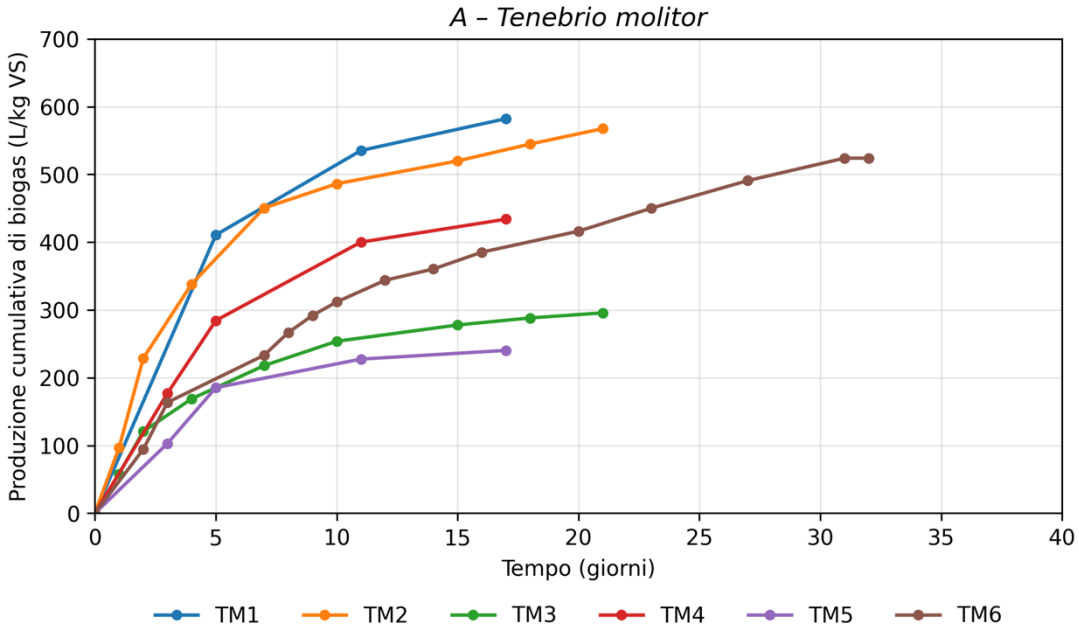
Un'analisi più dettagliata della cinetica di produzione e della variabilità tra frass ottenuti da differenti substrati di allevamento viene approfondita nel paragrafo 3.2.

3.2 **Frass da Hermetia illucens e Tenebrio molitor**

Il frass ottenuto dall'allevamento di *Tenebrio molitor* e *Hermetia illucens* è stato valutato come substrato per la produzione di biogas e biometano attraverso prove di digestione anaerobica. In particolare, sono stati confrontati frass derivanti da insetti allevati con differenti miscele di sottoprodotti, con l'obiettivo di valutare come la diversa alimentazione e le caratteristiche proprie delle due specie possano riflettersi sulla composizione del residuo e sul suo potenziale energetico [7] . Lo studio risulta particolarmente interessante poiché confronta entrambe le specie utilizzando più di una dieta, consentendo quindi di osservare anche la variabilità tra differenti tipologie di frass.

Per *T. molitor* sono state considerate sei tipologie di frass, indicate come TM1–TM6. Le larve sono state inizialmente alimentate con crusca di frumento e successivamente, nei trattamenti TM1–TM5, con differenti diete sperimentali costituite da combinazioni di sottoprodotti del riso, residui alimentari e sottoprodotti di origine vegetale, animale e della distillazione; TM6 rappresenta invece il trattamento di riferimento basato sulla crusca di frumento. Nel caso di *H. illucens*, le larve sono state inizialmente alimentate con dieta Gainesville, identificata come BSF1, e successivamente, nei trattamenti BSF2–BSF5, con differenti diete contenenti sottoprodotti del riso, di origine vegetale e dell'industria della distillazione e della birrificazione. Complessivamente sono state quindi ottenute undici tipologie di frass, sei da *T. molitor*e cinque da *H. illucens* [7] .

I diversi campioni sono stati sottoposti a prove di Biochemical Methane Potential (BMP) in condizioni mesofile a 40 °C e in triplicato. I reattori sono stati alimentati mantenendo un rapporto inoculo/substrato pari a 1:1 sulla base dei solidi totali e la produzione è stata monitorata fino alla sostanziale conclusione dell'attività metanigena [7] . L'andamento della produzione cumulativa di biogas riportato nelle curve seguenti permette di valutare non soltanto la quantità complessivamente prodotta, ma anche la velocità con cui la sostanza organica presente nei diversi campioni viene convertita nel corso della digestione.



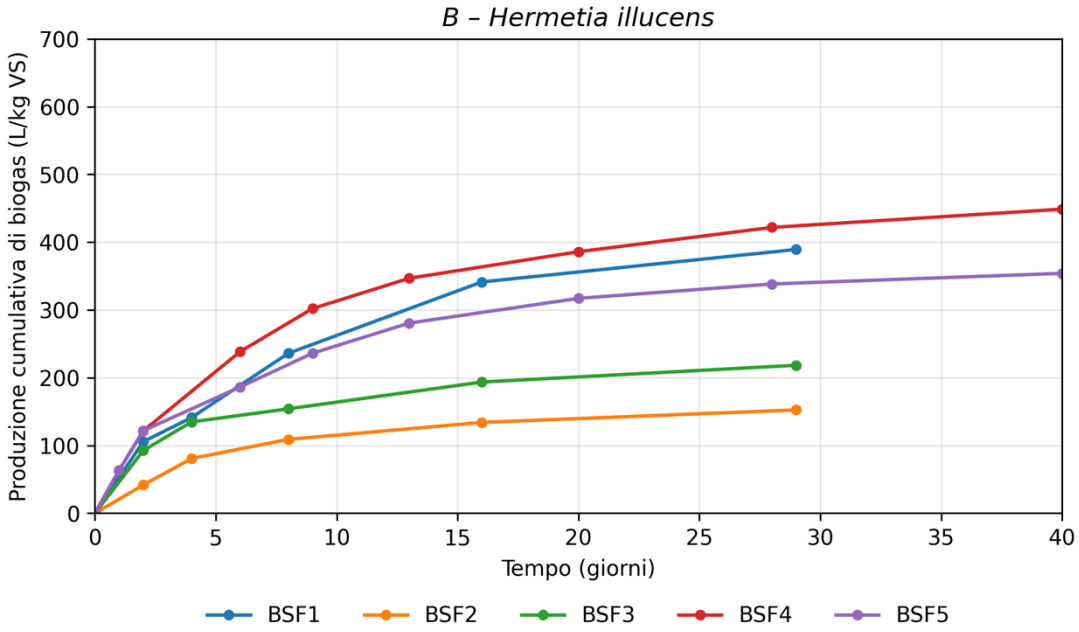


Figura 3-2: Andamento della produzione cumulativa di biogas del frass di Tenebrio molitor (A) e Hermetia illucens (B) ottenuto da differenti substrati di allevamento. Fonte: elaborazione propria su dati tratti da [7]

Le curve relative a *T. molitor* mostrano differenze evidenti sia nella produzione finale di biogas sia nella velocità con cui questa viene raggiunta. I campioni TM1 e TM2 presentano le produzioni più elevate e sono caratterizzati da un rapido incremento durante i primi giorni. TM1 raggiunge circa 411 L/kg VS già al quinto giorno e arriva a circa 582 L/kg VS al termine della prova, mentre TM2 raggiunge circa 450 L/kg VS al settimo giorno e una produzione finale di circa 568 L/kg VS. TM4 mostra un comportamento intermedio, con una produzione finale prossima a 434 L/kg VS, mentre TM3 e TM5 presentano valori più contenuti, rispettivamente pari a circa 296 e 240 L/kg VS [7] . I valori finali riportati nello studio confermano la notevole variabilità numerica tra i differenti campioni.

Un andamento differente è osservabile per TM6. In questo caso l'aumento della produzione è più graduale e si prolunga per un periodo maggiore: dopo circa 233 L/kg VS al settimo giorno, la produzione continua ad aumentare fino a raggiungere un valore finale prossimo a 530 L/kg VS. Il confronto tra TM1 e TM6 mostra quindi come campioni caratterizzati da produzioni finali relativamente elevate possano raggiungere tali valori attraverso cinetiche di degradazione differenti [7] .

Anche per *H. illucens* le curve evidenziano una notevole variabilità. BSF4 presenta la produzione finale più elevata, raggiungendo circa 449 L/kg VS, seguito da BSF1 con circa

389 L/kg VS e BSF5 con circa 354 L/kg VS. I campioni BSF2 e BSF3 mostrano invece produzioni inferiori, rispettivamente pari a circa 153 e 218 L/kg VS. In particolare, BSF4 e BSF5 continuano a incrementare la produzione anche dopo il ventesimo giorno, raggiungendo il valore finale intorno al quarantesimo giorno. L'andamento risulta quindi più prolungato rispetto a quello osservato in diversi campioni di *T. molitor* [7] .

Questa differenza nell'andamento temporale è confermata anche dalla durata media delle prove, pari a 23,0 ± 7,2 giorni per *T. molitor* e 34,5 ± 7,8 giorni per *H. illucens*. In entrambe le specie, tuttavia, la maggior parte del biogas viene prodotta nei primi dieci giorni del processo. Considerando complessivamente tutti i campioni, il frass di *T. molitor* ha raggiunto una produzione media di 441 ± 145,1 L/kg VS, rispetto a 312,6 ± 123,1 L/kg VS rilevati per *H. illucens*. Anche il BMP medio segue la stessa tendenza, con 229,2 ± 72,7 L CH_4/kg VS per *T. molitor* e 167 ± 75,6 L CH_4/kg VS per *H. illucens* [7] . Il confronto statistico tra le due specie indica tuttavia una tendenza verso produzioni maggiori per *T. molitor*, senza raggiungere il livello convenzionale di significatività statistica.

L'andamento delle curve può essere interpretato considerando ciò che viene assunto dagli insetti e, soprattutto, il modo in cui il substrato alimentare viene trasformato durante l'allevamento. Il frass presenta infatti caratteristiche riconducibili non soltanto alla matrice utilizzata come alimento, ma anche alle differenti esigenze nutrizionali e capacità digestive della specie. Nel complesso, il frass di *T. molitor* presenta una maggiore quota di frazione solubile in detergente neutro rispetto a quello di *H. illucens*. Tale frazione comprende composti più facilmente degradabili, come zuccheri semplici, amidi, pectine e proteine solubili. Parallelamente, il frass di *T. molitor* presenta mediamente una minore quantità di cellulosa e lignina e una maggiore disponibilità di sostanza organica facilmente fermentescibile [7] .

Queste caratteristiche possono contribuire a spiegare la produzione mediamente più elevata e, in diversi campioni, più rapida osservata per *T. molitor*. Al contrario, la maggiore presenza di frazioni strutturali nel frass di *H. illucens* può contribuire a una degradazione più graduale della sostanza organica. Le differenze tra i frass delle due specie riguardano infatti soprattutto il contenuto di umidità, la composizione delle frazioni fibrose e la quota di composti solubili, indicando come le caratteristiche del residuo siano strettamente legate anche alla trasformazione del substrato alimentare operata dall'insetto [7] .

La dieta rappresenta quindi un elemento importante nella formazione del frass, poiché il substrato assunto dall'insetto contribuisce a determinarne la composizione chimico-fisica. Tuttavia, nel caso considerato, le differenze numeriche osservate tra TM1–TM6 e BSF1–BSF5

non sono risultate statisticamente significative in termini di produzione di biogas e metano. Non è quindi possibile attribuire direttamente la maggiore o minore produzione di uno specifico campione esclusivamente alla dieta utilizzata. L'effetto dell'alimentazione deve essere interpretato insieme alle caratteristiche proprie della specie, alle esigenze nutrizionali, alla fisiologia digestiva e alla composizione finale del frass [7] .

Dal punto di vista applicativo, le differenze osservate nelle cinetiche di produzione assumono interesse non soltanto per la resa finale, ma anche per il tempo necessario a raggiungerla. Una conversione più rapida della sostanza organica può infatti consentire tempi di ritenzione inferiori e un turnover più elevato del substrato, mentre cinetiche più prolungate richiedono tempi maggiori per sfruttare pienamente il potenziale energetico della matrice. La valutazione del frass dovrebbe pertanto considerare congiuntamente resa finale e velocità di produzione del biogas.

3.2.1 *Confronto tra specie e variabilità del substrato*

Il confronto tra il frass di *Tenebrio molitor* e quello di *Hermetia illucens* mostra che le prestazioni nella digestione anaerobica non possono essere attribuite esclusivamente alla specie allevata. Nel caso analizzato nel paragrafo precedente, il frass di *T. molitor* ha mostrato una tendenza verso produzioni medie di biogas e metano superiori rispetto a *H. illucens*, anche se le differenze tra le due specie non hanno raggiunto il livello convenzionale di significatività statistica. Inoltre, all'interno della stessa specie, le differenti diete considerate non hanno determinato variazioni statisticamente significative nelle rese di biogas e metano. [7]

Un quadro parzialmente diverso emerge da uno studio condotto su frass provenienti da dieci allevamenti europei di *T. molitor* e *H. illucens*. In questo caso, il frass di *T. molitor* ha mostrato un avvio più rapido della produzione di metano, ma una minore stabilità del processo, mentre quello di *H. illucens* ha presentato una degradazione più graduale e produzioni cumulative di metano più elevate. Le rese complessivamente osservate erano comprese tra 0,3196 e 0,372 m^3 CH_4/kg VS, con concentrazioni di metano nel biogas comprese tra il 61,9 e il 65,0%. [4]

Il confronto tra i due studi evidenzia quindi che non è possibile stabilire in termini assoluti quale delle due specie produca sempre il frass con il maggiore potenziale energetico. I materiali analizzati derivano infatti da differenti sistemi di allevamento e da differenti substrati alimentari, fattori che possono modificare la composizione del residuo e, di conseguenza, il suo comportamento durante la digestione anaerobica. Nei campioni provenienti dagli allevamenti europei, ad esempio, il frass di *H. illucens* presentava mediamente un contenuto

di carbonio e un rapporto C/N superiori, mentre quello di *T. molitor* mostrava un contenuto di azoto maggiore. [4]

L'importanza del substrato utilizzato durante l'allevamento risulta ancora più evidente considerando campioni ottenuti dalla stessa specie. In prove condotte su *H. illucens*, le larve sono state alimentate con differenti matrici, tra cui insilato di mais, residui della produzione birraria, borlande della produzione di bioetanolo, piante acquatiche e crusca. I frass ottenuti sono stati successivamente sottoposti a prove BMP e hanno mostrato rese specifiche di metano comprese tra 201 e 287 mL CH_4/g VS. In questo caso sono state osservate differenze statisticamente significative tra alcuni dei campioni analizzati. [5]

Questo risultato rappresenta un esempio concreto di come ciò che viene assunto dall'insetto possa riflettersi sulle caratteristiche del materiale residuale. Anche a parità di specie, substrati alimentari differenti possono infatti portare alla formazione di frass con composizione e degradabilità non perfettamente sovrapponibili. La letteratura evidenzia che il substrato utilizzato per l'allevamento può influenzare parametri quali solidi totali e volatili, contenuto di azoto, proteine, lipidi e frazioni fibrose, tutti elementi che possono incidere sul successivo comportamento della matrice durante la digestione anaerobica. [2]

La variabilità del frass deve quindi essere interpretata come il risultato dell'interazione tra specie allevata, substrato alimentare e trasformazione operata dall'insetto durante il ciclo produttivo. I risultati disponibili mostrano che la specie può influenzare le caratteristiche del residuo, ma che anche le condizioni di allevamento e la natura dell'alimento contribuiscono a determinarne la composizione finale. Di conseguenza, la valutazione del frass come substrato per la digestione anaerobica richiede una caratterizzazione specifica del materiale, evitando di attribuire a una determinata specie una resa energetica costante e indipendente dalle condizioni nelle quali il frass è stato prodotto. [2], [7]

3.3 **Frass da Acheta domesticus**

Il frass derivante dall'allevamento di *Acheta domesticus* rappresenta un sottoprodotto ancora poco studiato dal punto di vista della valorizzazione energetica. Le informazioni disponibili riguardano soprattutto la caratterizzazione del materiale e il suo possibile impiego agronomico, mentre risultano ancora limitati gli studi specificamente dedicati alla produzione di biogas mediante digestione anaerobica.

Una recente caratterizzazione di frass proveniente da allevamenti commerciali ha mostrato, per *A. domesticus*, un contenuto di sostanza organica pari a circa 66,1%, un contenuto di azoto totale del 5,05%, fosfato totale dell'1,23%, potassio del 2,20% e un pH pari a 6,97. I grilli da

cui proveniva il campione erano allevati utilizzando una dieta a base di crusca di riso, mais e soia. Questi dati confermano la presenza di una rilevante componente organica e azotata nel residuo e mostrano, anche per il grillo domestico, il legame tra condizioni di allevamento, alimentazione e caratteristiche finali del frass. [11]

Un'indicazione sul possibile interesse energetico dei residui di allevamento dei grilli deriva da prove di digestione anaerobica condotte su materiale proveniente da *Gryllus spp.*. In questo caso sono stati misurati una produzione di biogas pari a circa 447,4 mL/g VS, un potenziale di biometano di 258,8 mL CH_4/g VS e un contenuto medio di metano nel biogas del 57,9%. Il residuo comprendeva principalmente materiale vegetale non consumato, insieme a parti degli insetti, e proveniva da allevamenti nei quali i grilli erano alimentati con cereali, soia ed erba medica. [12]

Tabella 3-3: Principali caratteristiche del frass di Acheta domesticus e valori energetici disponibili per residui di grilli (Gryllus spp.). Fonte: elaborazione propria su dati tratti da[11], [12]

Specie/gruppo	Parametro	Valore	Unità di misura
Acheta domesticus	Sostanza organica	66,1	%
Acheta domesticus	Azoto totale	5,05	%
Acheta domesticus	Fosfato totale	1,23	%
Acheta domesticus	Potassio	2,20	%
Acheta domesticus	pH	6,97	-
Gryllus spp.	Produzione di biogas	447,4	mL/g VS
Gryllus spp.	Potenziale di metano	258,8	mL CH_4/g VS
Gryllus spp.	Metano nel biogas	57,9	%

Nota: i dati energetici riportati per Gryllus spp. non sono direttamente attribuibili ad Acheta domesticus, ma sono utilizzati come termine di confronto in assenza di studi specifici sulla digestione anaerobica del frass di A. domesticus.

Tali valori indicano che i residui dell'allevamento dei grilli possono possedere caratteristiche compatibili con la produzione di biogas; tuttavia, non possono essere attribuiti direttamente ad *Acheta domesticus*, poiché lo studio considerava residui provenienti da grilli indicati complessivamente come *Gryllus spp.*. Anche le sintesi disponibili in letteratura riportano il dato energetico riferendolo ai grilli in generale e non specificamente al grillo domestico. [2], [12]

Per *A. domesticus* esistono quindi elementi che suggeriscono un possibile interesse del frass come matrice organica valorizzabile, ma le evidenze sperimentali non sono ancora

sufficienti per definirne con precisione il potenziale metanigeno. Questa limitata disponibilità di dati costituisce il principale elemento che distingue *A. domesticus* da *H. illucens* e *T. molitor*.

3.3.1 *Stato della letteratura e limiti degli studi disponibili*

La limitata disponibilità di dati energetici specifici per *Acheta domesticus* emerge anche considerando gli studi sulla digestione anaerobica del frass disponibili in letteratura. Una review dedicata alla produzione di biogas e biometano da residui dell'allevamento di insetti ha analizzato gli studi pubblicati tra il 2018 e il 2024, individuando lavori principalmente su *Hermetia illucens* e, in misura minore, su *Tenebrio molitor*, *Gryllus spp.*, *Zophobas morio* e *Bombyx mori*. Tra gli studi esaminati non viene riportata una prova di digestione anaerobica specificamente condotta sul frass di *A. domesticus*. [2]

La presenza di studi relativi a *Gryllus spp.* dimostra che i residui dell'allevamento dei grilli possono essere sottoposti a digestione anaerobica, ma non consente di trasferire direttamente tali risultati ad *A. domesticus*, poiché manca una valutazione energetica condotta specificamente sul frass del grillo domestico. [12]

Il principale limite conoscitivo per *A. domesticus* riguarda pertanto l'assenza di una caratterizzazione energetica specifica che permetta di collegare composizione del frass, substrato utilizzato nell'allevamento e resa durante la digestione anaerobica. Prove BMP condotte direttamente su frass di grillo domestico consentirebbero di verificare se le caratteristiche già osservate per questa matrice si traducano effettivamente in un potenziale interessante per la produzione di metano.

3.4 **Opportunità, criticità e prospettive**

La valorizzazione energetica del frass mediante digestione anaerobica rappresenta un'opzione ancora poco consolidata rispetto al suo impiego agronomico. Le prove sperimentali disponibili dimostrano tuttavia che differenti tipologie di frass possono essere utilizzate come substrato per la produzione di metano, con rese in alcuni casi comparabili a quelle di matrici già impiegate negli impianti di biogas. La principale questione applicativa riguarda quindi non soltanto il potenziale energetico della matrice, ma anche la possibilità di trasferire i risultati ottenuti sperimentalmente a condizioni operative più vicine alla scala reale. [4]

Un elemento potenzialmente favorevole è rappresentato dal numero relativamente ristretto di specie attualmente considerate negli studi sulla digestione anaerobica del frass. La letteratura disponibile si concentra infatti soprattutto su *H. illucens* e, in misura minore, su *T. molitor* e poche altre specie. Questa condizione può agevolare lo sviluppo di protocolli specifici di caratterizzazione e gestione delle principali tipologie di frass, concentrando l'attività di ricerca su un insieme limitato di matrici ricorrenti. Ciò non elimina tuttavia la necessità di considerare le differenze legate all'alimentazione e alle condizioni di allevamento. [2], [4]

Un ulteriore aspetto riguarda la scala delle sperimentazioni. Gran parte degli studi disponibili si basa su prove BMP condotte in batch e in condizioni di laboratorio. Sono state tuttavia effettuate anche prove semi-continue su frass di *H. illucens* proveniente da un impianto pilota, nelle quali è stata ottenuta una resa specifica di metano pari a 167 ± 15 mL CH_4/g VS, senza evidenziare effetti inibitori attribuibili al substrato, pur richiedendo attenzione all'elevato contenuto di azoto. Questi risultati costituiscono un primo elemento favorevole per il trasferimento del processo verso condizioni più applicative, ma rendono necessari ulteriori studi in sistemi continui e su scala maggiore. [5]

Le differenti cinetiche osservate suggeriscono inoltre che temperatura operativa e tempo di ritenzione potrebbero essere ottimizzati in funzione delle caratteristiche del frass considerato. Una produzione più rapida potrebbe risultare compatibile con tempi di ritenzione inferiori e condizioni di processo più spinte, mentre matrici caratterizzate da una degradazione più graduale potrebbero richiedere tempi maggiori per sfruttare pienamente il potenziale energetico disponibile. I risultati attualmente disponibili non consentono tuttavia di individuare direttamente un regime termico ottimale specifico per ciascuna specie; tale aspetto richiederebbe prove comparative condotte a differenti temperature e in sistemi continui.

Le prospettive future riguardano quindi la standardizzazione dei metodi di caratterizzazione, l'ottimizzazione delle condizioni operative e la verifica della fattibilità tecnica ed economica della filiera. In una prospettiva applicativa dovranno essere considerate anche la quantità di frass effettivamente disponibile, la continuità dell'approvvigionamento, le distanze di trasporto e la vicinanza agli impianti di digestione anaerobica. La sostenibilità complessiva del processo dipende infatti non soltanto dalla resa energetica del substrato, ma anche dall'organizzazione della sua catena di approvvigionamento e dalle caratteristiche dell'impianto nel quale viene utilizzato. [1], [4]

3.4.1 *Integrazione con economia circolare e agroenergie*

La digestione anaerobica del frass può essere inserita all'interno di una filiera integrata nella quale il residuo generato dall'allevamento degli insetti viene sottoposto a un'ulteriore fase di valorizzazione. In questo schema, l'allevamento consente di ottenere biomassa di interesse alimentare o mangimistico e, contemporaneamente, genera frass che può essere destinato alla produzione di biogas e biometano. Il recupero energetico del frass può quindi affiancarsi alla produzione primaria dell'insetto, contribuendo a un utilizzo più completo dei materiali generati dalla filiera. [2]

L'integrazione tra allevamento di insetti e impianto di biogas può offrire alcune sinergie anche dal punto di vista energetico. Il biogas può essere utilizzato per la produzione combinata di energia elettrica e termica oppure, attraverso processi di upgrading, convertito in biometano. Inoltre, il calore recuperato dall'impianto può essere utilizzato all'interno dell'allevamento degli insetti, ad esempio per contribuire al mantenimento delle condizioni termiche richieste dal processo produttivo. In questo modo, parte dell'energia ottenuta dalla valorizzazione del residuo può essere reimpiegata all'interno della stessa filiera. [1], [5]

La valutazione della filiera nel suo complesso richiede inoltre di considerare non soltanto la resa specifica del frass, ma anche la quantità di residuo generata durante l'allevamento. Rapportando la produzione energetica alla biomassa larvale ottenuta, sono stati stimati mediamente 124,6 ± 44,7 L CH_4 per kg di larve per *T. molitor* e 170,0 ± 46,6 L CH_4 per kg di larve per *H. illucens*. Sebbene il frass di *T. molitor* presentasse rese superiori quando espresse sulla base dei solidi volatili, la situazione si invertiva rapportando il risultato alla quantità di larve prodotte. Tale differenza è legata al rapporto frass/biomassa larvale, pari mediamente a circa 0,80 kg di frass per kg di larve per *T. molitor* e 2,8 kg/kg per *H. illucens*. Il dato evidenzia come, in una prospettiva di filiera, la valutazione energetica debba considerare congiuntamente la resa del materiale e la quantità di sottoprodotto effettivamente generata. [7]

Un ulteriore prodotto della digestione anaerobica è il digestato, nel quale viene conservata parte dei nutrienti presenti nella matrice iniziale. Il suo impiego agronomico può consentire di affiancare al recupero energetico anche il recupero dei nutrienti, rafforzando il collegamento tra produzione di energia e sistema agricolo. La qualità del digestato dipende tuttavia dalle caratteristiche del substrato e dalle condizioni operative del processo; inoltre, nel caso specifico della digestione del frass, le informazioni disponibili sono ancora limitate e richiedono ulteriori approfondimenti. [1], [2] La letteratura generale sulla digestione anaerobica collega, infatti, il recupero energetico all'impiego del digestato come biofertilizzante e al riciclo dei nutrienti nel sistema agricolo.

Questo modello di integrazione tra recupero energetico e riciclo dei nutrienti è rappresentato nella Figura 3-3, nella quale la digestione anaerobica costituisce un elemento di collegamento tra gestione delle biomasse, produzione energetica e restituzione dei nutrienti al sistema agricolo. [1] La figura originale rappresenta proprio il collegamento tra biomassa, impianto di biogas, upgrading, energia, digestato e sistema agricolo.

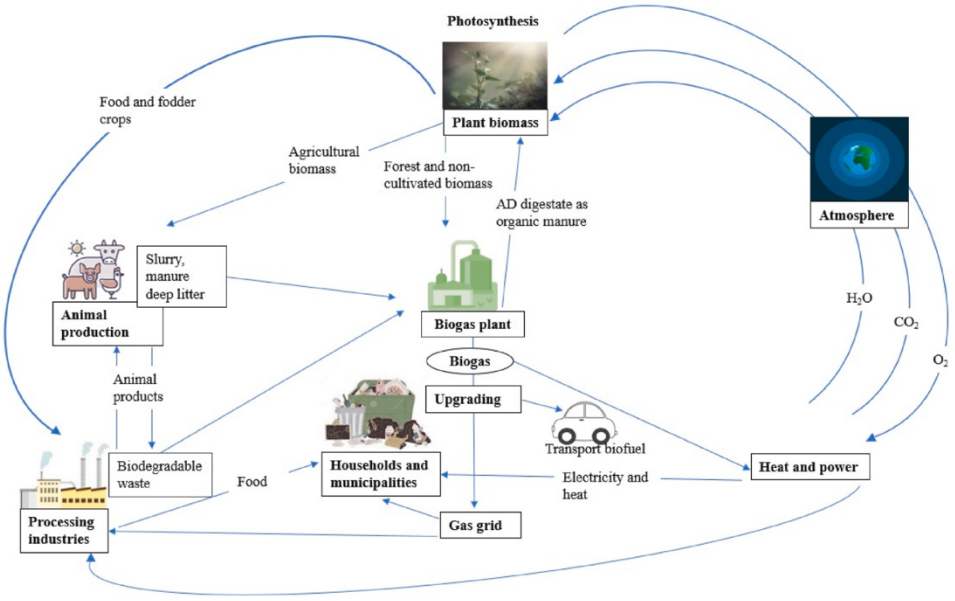


Figura 3-3: Benefici della digestione anaerobica nella gestione circolare delle biomasse. Fonte: tratto da [1]

Nel complesso, l'integrazione tra allevamento di insetti e digestione anaerobica può essere interpretata come un modello di bioraffineria integrata, nel quale biomassa larvale, energia e nutrienti rappresentano differenti prodotti ottenibili dalla valorizzazione della stessa filiera. La concreta applicazione di questo modello richiede tuttavia una disponibilità sufficientemente regolare del frass, un collegamento efficiente tra allevamenti e impianti di digestione anaerobica e una valutazione della sostenibilità economica complessiva. In condizioni favorevoli, la digestione anaerobica può quindi rappresentare una fase aggiuntiva della valorizzazione del frass, consentendo di associare al recupero della sostanza organica sotto forma di energia il successivo recupero dei nutrienti attraverso il digestato. [1], [2], [7] Il modello di economia circolare di Subbarao sottolinea proprio l'importanza di integrare gestione dei residui, agricoltura, filiera e produzione energetica.

CONCLUSIONI

La presente tesi ha avuto l'obiettivo di valutare il potenziale del frass derivante dall'allevamento di insetti come substrato per la produzione di biogas e biometano mediante digestione anaerobica. Attraverso l'analisi della letteratura scientifica sono state considerate le caratteristiche della matrice, le principali condizioni che possono influenzarne il comportamento durante il processo e le evidenze disponibili per *Hermetia illucens*, *Tenebrio molitor* e *Acheta domesticus*. Nel complesso, i risultati analizzati mostrano che il frass può essere valorizzato energeticamente e può raggiungere rese di metano confrontabili, in alcuni casi, con quelle di biomasse già impiegate negli impianti di biogas.

Un elemento centrale emerso dall'analisi è rappresentato dall'elevata variabilità del frass. Specie allevata, substrato alimentare e trattamento del residuo possono modificare il contenuto di solidi, la composizione della sostanza organica e la successiva cinetica di produzione del biogas. Di conseguenza, non è possibile attribuire a una singola specie una resa energetica costante né valutare il potenziale del frass esclusivamente sulla base del valore finale di metano prodotto. Anche la velocità di conversione e il tempo necessario per raggiungere la resa finale rappresentano parametri di interesse nella prospettiva di un'applicazione impiantistica.

Per *Acheta domesticus*, inoltre, la scarsità di prove specifiche di digestione anaerobica rappresenta ancora un importante limite conoscitivo e rende necessarie prove BMP e sperimentazioni dedicate prima di poterne definire con maggiore precisione il potenziale energetico.

Il frass può quindi essere considerato un sottoprodotto innovativo nell'ambito delle agroenergie. Il suo interesse deriva dalla possibilità di associare alla produzione di biomassa da insetti un'ulteriore valorizzazione del residuo generato durante l'allevamento. La digestione anaerobica consente infatti di recuperare parte della sostanza organica sotto forma di energia, mantenendo allo stesso tempo la possibilità di recuperare i nutrienti attraverso il digestato. In questo modo, il frass non viene considerato soltanto come un materiale residuale da gestire, ma come una possibile risorsa inserita all'interno di una filiera maggiormente orientata al recupero e all'economia circolare.

Un limite attuale è rappresentato dalla ridotta diffusione degli allevamenti di insetti rispetto alle filiere agricole e zootecniche tradizionali, dalla quale deriva una disponibilità di frass ancora limitata e non sempre continua. Questo rende poco realistico, almeno nelle condizioni attuali, considerare il frass come unico substrato per impianti di digestione anaerobica di grandi dimensioni e rende più interessante la sua integrazione in sistemi già esistenti. Allo stesso tempo, il numero relativamente ristretto di specie di maggiore interesse per l'allevamento può rappresentare un elemento positivo. La ricerca può infatti concentrarsi su poche tipologie di frass ricorrenti, permettendo di approfondirne meglio le caratteristiche e di sviluppare protocolli specifici per il loro utilizzo. Questo vantaggio riguarda soprattutto la possibilità di caratterizzare e standardizzare più facilmente le principali matrici, e non implica che un numero minore di specie determini automaticamente migliori rese nella digestione anaerobica.

Per il futuro sarà necessario passare dalla dimostrazione del potenziale energetico alla verifica della reale applicabilità della filiera. Saranno quindi importanti ulteriori prove in sistemi continui e su scala pilota, una maggiore standardizzazione dei metodi di caratterizzazione e una migliore conoscenza delle quantità di frass effettivamente prodotte. Dovranno essere valutati anche la continuità dell'approvvigionamento, le distanze tra allevamenti e impianti di digestione anaerobica, i costi di trasporto, l'eventuale utilizzo in co-digestione e la gestione del digestato. La futura valorizzazione del frass dipenderà quindi non soltanto dalla quantità di metano ottenibile, ma dalla sostenibilità tecnica, logistica ed economica dell'intera filiera.

Infine, lo sviluppo di questa forma di valorizzazione richiederà condizioni favorevoli anche dal punto di vista politico, sociale e culturale. Saranno necessarie politiche capaci di sostenere l'innovazione e l'integrazione tra settore agricolo, allevamento di insetti e produzione energetica, insieme a un quadro normativo chiaro per la gestione e l'impiego dei sottoprodotti. Parallelamente, sarà importante favorire una maggiore conoscenza e accettazione di sistemi produttivi basati sul recupero dei residui e sull'utilizzo degli insetti all'interno delle filiere agroalimentari. In questa prospettiva, la digestione anaerobica del frass rappresenta una possibilità ancora in fase di sviluppo, ma coerente con l'evoluzione verso sistemi agroenergetici nei quali produzione di biomassa, recupero energetico e riciclo dei nutrienti vengono considerati come componenti integrate della stessa filiera.

BIBLIOGRAFIA

[1] P. M. V Subbarao, T. C. D' Silva, K. Adlak, S. Kumar, R. Chandra, and V. K. Vijay, "Anaerobic digestion as a sustainable technology for efficiently utilizing biomass in the context of carbon neutrality and circular economy," *Environ. Res.*, vol. 234, 2023, doi: 10.1016/j.envres.2023.116286.

[2] A. Dal Magro, D. Lovarelli, J. Bacenetti, and M. Guarino, "The potential of insect frass for sustainable biogas and biomethane production: A review," *Bioresour. Technol.*, vol. 412, no. May, p. 131384, 2024, doi: 10.1016/j.biortech.2024.131384.

[3] A. Cattaneo, M. Meneguz, S. Dabbou, F. Tambone, and B. Scaglia, "Local circular economy: BSF insect rearing in the Italian Agri-Food Industry," *Waste Management*, vol. 179, pp. 234–244, 2024, doi: 10.1016/j.wasman.2024.03.016.

[4] P. Wojnarova, P. Jachimowicz, and K. Bułkowska, "Comprehensive assessment of frass as a biogas resource: Insights from the European insect farming industry," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 13, no. 6, 2025, doi: 10.1016/j.jece.2025.120089.

[5] H. Wedwitschka, D. Gallegos Ibanez, and D. R. Jáquez, "Biogas Production from Residues of Industrial Insect Protein Production from Black Soldier Fly Larvae Hermetia illucens (L.): An Evaluation of Different Insect Frass Samples," *Processes*, vol. 11, no. 2, 2023, doi: 10.3390/pr11020362.

[6] T. Klammsteiner, V. Turan, M. F.-D. Juárez, S. Oberegger, and H. Insam, "Suitability of black soldier fly frass as soil amendment and implication for organic waste hygienization," *Agronomy*, vol. 10, no. 10 October, 2020, doi: 10.3390/agronomy10101578.

[7] A. Dal Magro, J. Bacenetti, S. Bellezza Oddon, I. Biasato, and M. Guarino, "Potential biomethane production from frass of Tenebrio molitor and Hermetia illucens reared on by-products based diets," *Biomass Bioenergy*, vol. 205, 2026, doi: 10.1016/j.biombioe.2025.108559.

[8] H. C. S. Amorim *et al.*, "Insect frass composition and potential use as an organic fertilizer in circular economies," *J. Econ. Entomol.*, vol. 117, no. 4, pp. 1261–1268, 2024, doi: 10.1093/jee/toad234.

[9] C. Rashama, E. M. Motsetsi, R. Christian, and T. S. Matambo, “Preliminary biogas production assessment on insect frass and leachates of the organic wastes fed to larvae: A Johannesburg-based factory case study,” *Energy Sci. Eng.*, vol. 12, no. 10, pp. 3986–3994, 2024, doi: 10.1002/ese3.1770.

[10] P. Wojnarova, P. Jachimowicz, and L. Poschmaier-Kamarad, “Evaluating different insect frass’ biomethane potentials under varying substrate dose scenarios,” *Applications in Energy and Combustion Science*, vol. 26, 2026, doi: 10.1016/j.jaecs.2026.100506.

[11] P. Sarin, Y. N. Ma, P. Theerakulpisut, and N. Riddech, “Cricket and Locust Frass as Organic Fertilizers: Microbial Composition, Nutrient Availability, and Effects on Seedling Growth,” *J. Soil Sci. Plant Nutr.*, vol. 26, no. 1, pp. 1763–1779, 2026, doi: 10.1007/s42729-025-02962-3.

[12] P. Bulak, K. Proc, M. Pawłowska, A. Kasprzycka, W. Berus, and A. Bieganowski, “Biogas generation from insects breeding post production wastes,” *J. Clean. Prod.*, vol. 244, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118777.

[13] C. L. Coudron *et al.*, “BugBook: Basic information and good practices on how to maintain stock populations for Tenebrio molitor and Hermetia illucens for research,” *J. Insects Food Feed*, vol. 11, no. 18, pp. S241–S267, 2025, doi: 10.1163/23524588-bja10240.

[14] E. Rowe, K. Y. R. López, K. M. Robinson, K. M. Baudier, and M. Barrett, “Farmed cricket (Acheta domesticus, Gryllus assimilis, and Gryllodes sigillatus; Orthoptera) welfare considerations: recommendations for improving global practice,” *J. Insects Food Feed*, vol. 10, no. 8, pp. 1253–1311, 2024, doi: 10.1163/23524588-00001087.

[15] M. Barrett, R. K. Godfrey, A. Schnell, and B. Fischer, “Farmed yellow mealworm (Tenebrio molitor; Coleoptera: Tenebrionidae) welfare: species-specific recommendations for a global industry,” *J. Insects Food Feed*, vol. 86, 2024, doi: 10.1163/23524588-20230104.

[16] J. A. Morales-Ramos, M. G. Rojas, and A. T. Dossey, “Age-dependent food utilisation of Acheta domesticus (Orthoptera: Gryllidae) in small groups at two temperatures,” *J. Insects Food Feed*, vol. 4, no. 1, pp. 51–60, 2018, doi: 10.3920/jiff2017.0062.

[17] E. Bessette, B. A. P. Williams, and N. V. Meyling, “Preparing eugregarine parasites and their cricket host Acheta domesticus as a model for gregarine infection studies,” *MethodsX*, vol. 13, no. May, pp. 1–14, 2024, doi: 10.1016/j.mex.2024.102888.

[18] S. Capitan, Å. Berggren, and M. Weih, “Frass pre-treatment and application method impact spring wheat vegetative growth and nutrient concentration,” *J. Insects Food Feed*, vol. 11, no. 16, pp. 3007–3016, 2025, doi: 10.1163/23524588-bja10245.

[19] Z. Wang, Y. Hu, S. Wang, G. Wu, and X. Zhan, “A critical review on dry anaerobic digestion of organic waste: Characteristics, operational conditions, and improvement strategies,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 176, 2023, doi: 10.1016/j.rser.2023.113208.