

Analisi del ciclo di vita di un allevamento di trote: valutazione preliminare per l'inclusione di farina di insetto nei mangimi

Michele Zoli¹, Lorenzo Rossi², Baldassare Fronte³, Ilaria Biasato⁴, Sara Bellezza Oddon⁴, Zaira Loiotine⁴, Laura Gasco⁴, Jacopo Bacenetti¹

Abstract: L'acquacoltura è un settore in crescita, tuttavia l'impatto ambientale dei mangimi costituisce una delle principali criticità. Questo studio, inserito nel Progetto newRIFF, ha lo scopo di quantificare e caratterizzare l'impatto ambientale di un allevamento tradizionale di trote e di confrontare un mangime tradizionale con due mangimi contenenti il 5% e 10% di farina di insetto. I risultati dell'analisi sulla trota allevata mostrano valori in linea con la letteratura ($1.984,41 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/t di pesce}$). Il confronto tra i mangimi ha evidenziato alcuni trade-off, con differenze contenute (<10%). Tuttavia, un'ottimizzazione della produzione di farina di insetto, dovuta a un incremento di scala di produzione, potrebbe portare a potenziali benefici ambientali.

1. Introduzione

La trota iridea (*Oncorhynchus mykiss*) è una delle principali specie ittiche allevate nell'acquacoltura europea e, in questo settore, l'attenzione per le questioni ambientali è spesso focalizzata sull'utilizzo dei mangimi. Per affrontare tali problematiche sono stati proposti vari ingredienti alternativi di cui è importante valutarne la sostenibilità ambientale. Il progetto newRIFF "New life for rice by-products and agricultural wastes: insects bioconversion for fish feed production" studia la possibilità di sostituire le proteine tradizionali con farine derivate da due specie di insetti (*Hermetia illucens* e *Tenebrio molitor*) allevati su sottoprodotti e scarti locali, tra cui i sottoprodotti della filiera risicola. Tra gli obiettivi vi è anche la valutazione dei potenziali benefici ambientali, confrontando le performance ambientali delle prove di allevamento delle trote con farina di insetto con quelle di un allevamento tradizionale. Lo scopo di questo studio è di valutare gli impatti ambientali, attraverso la metodologia *Life Cycle Assessment*, di un allevamento tradizionale di trote che servirà da benchmark per il progetto newRIFF. Inoltre, viene effettuato anche un primo confronto delle performance ambientali di un mangime utilizzato nell'azienda benchmark, nel quale il 5% e il 10% di farina di pesce vengono sostituiti con farina

¹ Università degli Studi di Milano, Dipartimento di Scienze e Politiche Ambientali, via G. Celoria 2, 20133, Milano, Italy

² Fondazione Edmund Mach Centro Trasferimento Tecnologico, Via Edmund Mach 1, San Michele All'Adige, 38010, Trento, Italy

³ Università di Pisa, Dipartimento di Scienze Veterinarie, Viale delle Piagge 2, 56121, Pisa, Italy

⁴ Università di Torino, Dipartimento di Scienze Agrarie, Forestali e Alimentari, Via Leonardo da Vinci 44, 10095, Grugliasco (TO), Italy

di *Hermetia illucens* allevata su un substrato composto da scarti e sottoprodotti alimentari, inclusi alcuni sottoprodotti della filiera risicola.

2. Materiali e metodi

2.1 Descrizione dell'azienda analizzata

L'azienda analizzata si occupa di tutte le fasi dell'allevamento, dall'acquisto delle uova fino al raggiungimento della taglia commerciale, che varia tra 300 g a 1,1 kg. L'azienda, localizzata in Toscana, è composta da un totale di 26 vasche per l'allevamento dei pesci, più una zona di avannotteria in cui viene gestita la schiusa delle uova e l'allevamento nei primi stadi di crescita. L'acqua viene prelevata attraverso un sistema di pompe da un torrente adiacente alle strutture aziendali, fatta scorrere all'interno delle vasche e rilasciata nello stesso torrente dopo un filtraggio. Per garantire il giusto livello di ossigenazione all'interno delle vasche viene utilizzato anche ossigeno liquido. I dati analizzati ricavati dall'azienda in oggetto si riferiscono all'anno di produzione 2023 in cui l'indice di conversione alimentare (FCR) medio è stato di 1,05. All'interno dell'azienda avviene anche il processamento e l'impacchettamento delle trote allevate: tuttavia, tali processi sono stati esclusi dall'analisi.

2.2 Goal and scope definition

Gli obiettivi principali di questo sono:

- Quantificare e caratterizzare l'impatto ambientale delle trote allevate in un'azienda tradizionale italiana;
- Confrontare l'impatto ambientale di un mangime convenzionale contenente il 45% di farina di pesce con un ipotetico mangime isoproteico e isoenergetico, in cui vi è una parziale sostituzione (5% e 10%) di farina di pesce con farina di *Hermetia illucens*.

L'unità funzionale scelta per l'analisi è 1 tonnellata di peso vivo di pesce, con un approccio "from cradle-to farm gate" per la definizione dei confini di sistema. L'analisi include quindi tutte le operazioni di produzione delle materie prime, la fabbricazione e la manutenzione degli impianti (vasche, pompe, reti anti-predatori), la gestione dell'allevamento (alimentazione, spostamenti interni), produzione e uso dei principali fattori di produzione (consumi energetici, mangimi, ossigeno liquido) e le emissioni metaboliche dei pesci.

Per quanto riguarda il confronto tra i mangimi, essendo isoproteici e isoenergetici, l'unità funzionale scelta è stata di 1 kg di mangime, con un approccio, anche in questo caso, *from cradle to gate* per definire i confini del sistema (figura 1).

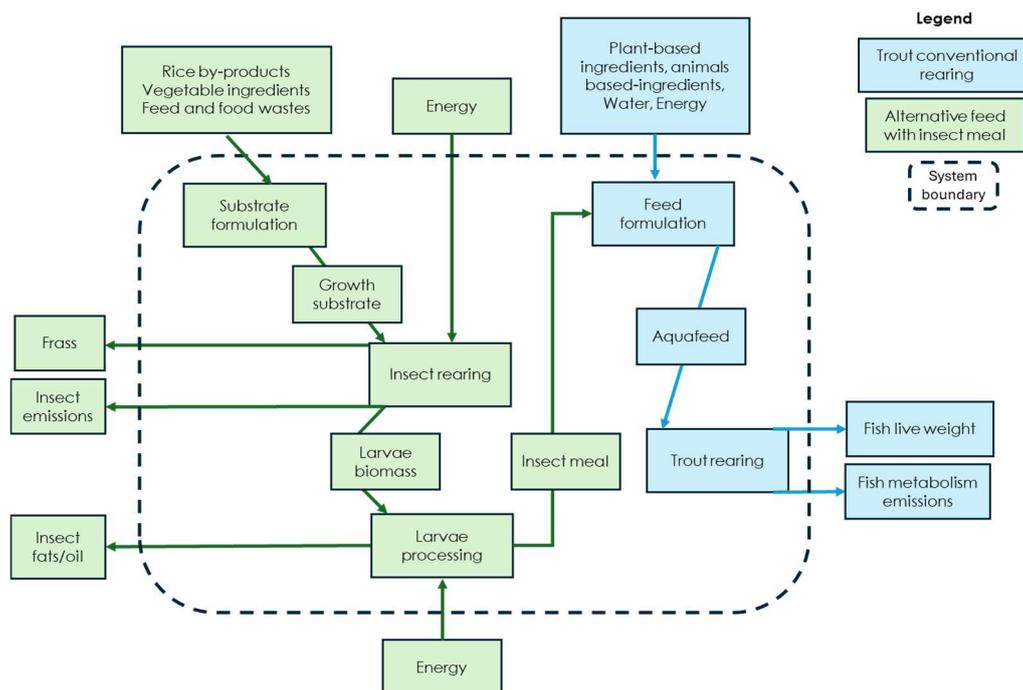


Figura 1. Schematizzazione dei confini del sistema e dei processi considerati nell'analisi.

2.3 Life Cycle Inventory

Per effettuare l'analisi sono stati raccolti alcuni dati primari, mentre per alcune informazioni utilizzate sono stati utilizzati dati secondari. In particolare, dati primari, raccolti attraverso un'intervista agli operatori e manager dell'azienda, riguardano la struttura aziendale, la produzione annua, i consumi energetici, i mangimi, l'ossigeno liquido e l'indice di conversione alimentare (FCR, 1,1). Dati secondari ricavati da database sono stati utilizzati per gli ingredienti dei mangimi, materiali e fattori produttivi (pompe, uova, impatto del mix elettrico utilizzato), mentre le emissioni di composti azotati e fosfatici sono state stimate con un modello basato sul bilancio di massa, adattato da Bureau and Hua, (2010). La tabella 1 riporta alcuni dati ricavati per l'azienda di trote.

Parametro	Valore
Dati primari	
Produzione	500 t di pesce/anno
Uova	3.475.000 #/anno
Mortalità	10%
Indice di conversione alimentare (FCR)	1.1
Ossigeno liquido	0.75 t/t di pesce
Consumo di elettricità	446 kWh/t di pesce
Consumo di diesel	98.8 l/t di pesce
Numero di vasche	26
Dati stimati attraverso bilancio di massa	
Azoto solido	13.42 kg N/t di pesce

Azoto disciolto	28.5 kg N/t di pesce
Fosforo solido	5.9 kg P/t di pesce
Fosforo disciolto	2.45 kg P/t di pesce

Tabella 1. Dati esemplificativi raccolti e stimati per l'analisi delle performance ambientali della produzione di trote nell'azienda tradizionale.

Per la modellizzazione della farina di insetto come fonte proteica alternativa, è stato utilizzato un mix di dati primari e secondari. In particolare, la composizione del substrato di crescita per le larve è stata definita all'interno del progetto, rappresentando un dato primario. Anche il valore dell'FCR delle larve è un dato primario, poiché l'allevamento è stato testato direttamente nel contesto del progetto newRIFF. Anche per quantificare l'impatto del substrato di crescita, è stata adottata una combinazione di dati primari e secondari. In particolare, l'impatto dei sottoprodotti del riso è stato stimato a partire da dati primari raccolti in diverse campagne risicole, applicando un'allocatione economica tra il riso processato e i suoi sottoprodotti. Gli scarti derivanti dalla filiera alimentare e mangimistica sono stati considerati *burden-free*, mentre per altri ingredienti sono stati utilizzati dati secondari provenienti dal database ecoinvent. Infine, per i consumi energetici e le emissioni dovute al metabolismo delle larve sono stati impiegati dati di letteratura (Smetana et al., 2019; Ermolaev et al., 2019) (Tabelle 2-3). Per il trasporto di tutti gli ingredienti del substrato è stata considerata una distanza di 30 km.

Composizione substrato di crescita	Valore (%)
Trebbie di birra	32.5
Lievito	5.5
Uova rotte	4.5
Borlanda liquida	17.0
Borlanda secca	0.5
Scarti di mix vegetale	5.0
Pellicola di nocciola	3.0
Pellicola argentea del caffè	1.0
Siero di latte	3.5
Grana verde	6.0
Lolla di riso	0.5
Pula di riso	0.5
Rotture di riso	0.5
Altri sottoprodotti del riso	4.0
Acqua	16.0

Parametri di crescita insetti	Valori
FCR (kg substrato/kg larve)	1,5
Durata ciclo (giorni)	7
Uova (g/kg farina)	0.36
Larve (kg larve/kg farina)	1,44
Elettricità (kWh/kg farina)	1.5
Acqua (kg/kg larve)	30
Output	
Farina di insetto (kg)	1
Olio di insetto (kg)	0,34

Tabelle 2-3. Composizione percentuale del substrato di crescita delle larve e alcuni dati e parametri utilizzati per quantificare l'impatto della farina di insetto.

2.4 Life Cycle Impact Assessment

Tutti i dati di inventario sono stati convertiti in impatti ambientali attraverso il metodo di caratterizzazione Environmental Footprint 3.1, analizzando le seguenti categorie di impatto: Acidificazione, Cambiamento climatico, Ecotossicità - acqua dolce, Formazione particolato, Eutrofizzazione - marina, Eutrofizzazione - acqua dolce, Eutrofizzazione - terrestre, Tossicità umana - effetti cancerogeni, Tossicità umana - effetti non cancerogeni, Uso del suolo, Assottigliamento ozono, Formazione di smog fotochimico, Uso di risorse - fossili, Uso di risorse

- minerali e metalli. Inoltre, sono state valutate le categorie di impatto Domanda cumulativa di energia e la Net primary production use (Papadryphon et al., 2004).

3. Risultati e discussione

I risultati delle performance ambientali dell'azienda analizzata sono in linea con quanto riportato in altri studi di letteratura. In particolare, focalizzandosi sul cambiamento climatico (1.984,41 kg CO₂ eq/t), il valore risulta inferiore a quello riportato da Pouil et al. (2024) (2.571 kg CO₂ eq/t) e rientra nel range dei sistemi Flow Through (1.157 – 3.561 kg CO₂ eq/t, Aubin et al., 2009; Dekamin et al., 2015; Maiolo et al., 2021; Samuel-Fitwi et al., 2013), mentre rimane significativamente più basso rispetto ai RAS, che possono raggiungere valori fino a 13.622 kg CO₂ eq/t (Dekamin et al., 2015; Samuel-Fitwi et al., 2013). La maggiore impronta climatica dei sistemi RAS è legata al loro elevato consumo energetico, dovuto alla necessità di ricircolare l'acqua attraverso processi di filtrazione, ossigenazione e controllo della temperatura, che richiedono un funzionamento continuo di pompe e sistemi di trattamento, aumentando così il fabbisogno elettrico e l'impatto complessivo.

Categoria di Impatto	Unità	Valore
Acidificazione	mol H ⁺ eq *10 ⁻²	19,30
Cambiamento climatico	kg CO ₂ eq	1.984,41
Ecotossicità, acqua dolce	CTUe	10,4892.70
Formazione particolato	Incr. malattie *10 ⁻⁸	1,13
Eutrofizzazione, marina	kg N eq *10 ⁻²	34,01
Eutrofizzazione, acqua dolce	kg P eq *10 ⁻³	1,74
Eutrofizzazione, terrestre	mol N eq *10 ⁻²	77,60
Tossicità umana, effetti cancerogeni	CTUh *10 ⁻¹⁰	5,57
Tossicità umana, effetti non cancerogeni	CTUh *10 ⁻⁸	1,80
Uso del suolo	Pt	116.580,59
Assottigliamento ozono	kg CFC11 eq *10 ⁻⁸	9,37
Formazione di smog fotochimico	kg NMVOC eq *10 ⁻²	10,68
Uso di risorse, fossili	MJ	27.316,34
Uso di risorse, minerali e metalli	kg Sb eq *10 ⁻⁶	4,08
Domanda cumulativa totale di energia	MJ eq	48.056,95
Net primary production use	kg C	6.684,31

Tabella 4. Impatti ambientali per 1 t di peso vivo di trota dell'azienda analizzata.

La figura 2 riporta invece l'analisi dei contributi degli impatti dell'azienda di trote. Il consumo dei mangimi rappresenta il principale contributore nella maggior parte delle categorie di impatto: essi sono responsabili del 50% del cambiamento climatico, 83% della formazione di particolato, 97% uso del suolo e del 74% nell'assottigliamento strato di ozono. Inoltre, il loro impatto relativo non è mai inferiore al 30% in nessuna categoria, ad eccezione dell'eutrofizzazione marina e delle acque dolci in cui le emissioni dei composti azotati e fosforici sono i principali hotspot (rispettivamente 67 e 46%). Sorprendentemente, l'elettricità ha un ruolo minoritario, con quote di impatto relative sempre inferiori al 10%. Tuttavia, il consumo di carburante per la logistica dell'azienda ha un impatto non irrilevante arrivando fino al 46% nella formazione di smog fotochimico. L'ossigeno liquido è responsabile del 20% del cambiamento climatico e 30% nell'uso delle risorse fossili. Infine, uova e infrastrutture hanno impatti contenuti, sempre inferiori al 5%. L'unica eccezione è rappresentata dall'impatto delle uova nell'eutrofizzazione delle acque dolci che arriva al 15%.

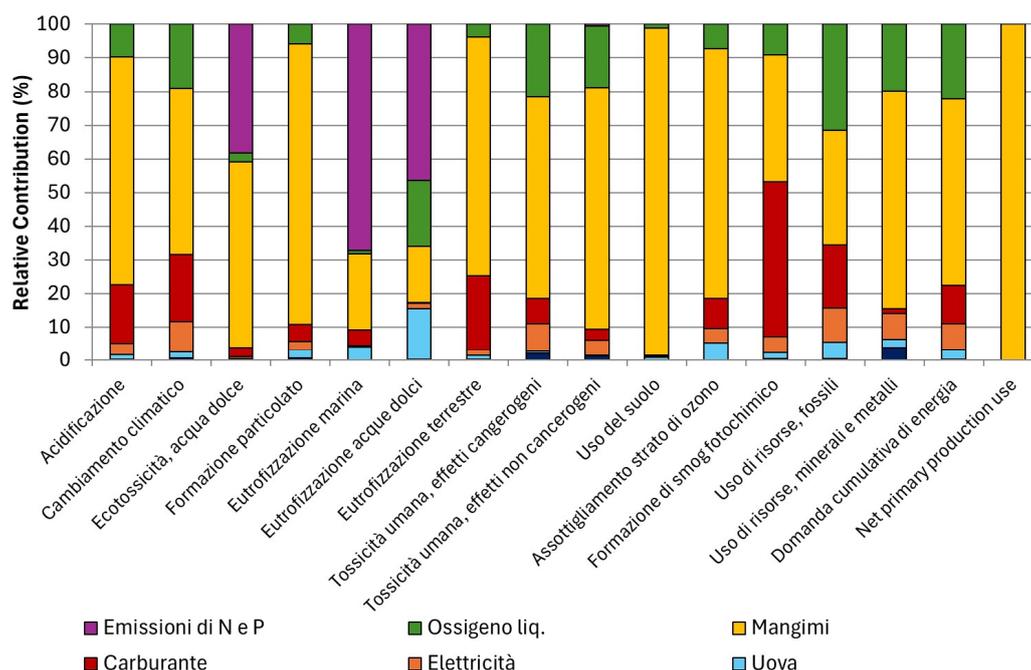


Figura 2. Analisi dei contributi relativi all'impatto dei sottoprocessi inclusi nell'analisi.

La tabella 5 riporta gli impatti ambientali di un 1 kg di uno dei mangimi con il più alto contenuto di farina di pesce (45%) utilizzato dall'azienda.

Categoria di Impatto	Unità	Valore
Acidificazione	mol H ⁺ eq *10 ⁻³	8,66
Cambiamento climatico	kg CO ₂ eq	1,31
Ecotossicità, acqua dolce	CTUe	61,78
Formazione particolato	Incr. malattie *10 ⁻⁸	7,41
Eutrofizzazione, marina	kg N eq *10 ⁻³	4,25
Eutrofizzazione, acqua dolce	kg P eq *10 ⁻³	0,19
Eutrofizzazione, terrestre	mol N eq *10 ⁻²	2,65
Tossicità umana, effetti cancerogeni	CTUh *10 ⁻¹⁰	6,71
Tossicità umana, effetti non cancerogeni	CTUh *10 ⁻⁸	1,65
Uso del suolo	Pt	53,27
Assottigliamento ozono	kg CFC11 eq *10 ⁻⁸	2,11
Formazione di smog fotochimico	kg NMVOC eq *10 ⁻³	6,22
Uso di risorse, fossili	MJ	8,85
Uso di risorse, minerali e metalli	kg Sb eq *10 ⁻⁶	4,11
Uso dell'acqua	m ³ depriv.	1,01
Domanda cumulativa totale di energia	MJ eq	17,23
Net primary production use	kg C	11,92

Tabella 5. Impatti ambientali per 1kg di mangime utilizzato nell'azienda di trote.

Nell'Immagine 2 è riportato il confronto relativo degli impatti ambientali tra il mangime di riferimento e due mangimi contenenti rispettivamente il 5% (HI5) e il 10% (HI10) di farina di

insetto. Il confronto non evidenzia un trend netto: per quanto riguarda l'acidificazione, la formazione di particolato, l'eutrofizzazione marina e la formazione di smog fotochimico, il mangime tradizionale presenta impatti leggermente superiori, con differenze comprese tra il 2% e il 4%. Nella categoria di impatto Net Primary Production Use, invece, i mangimi con farina di insetti mostrano un vantaggio significativo, con una riduzione dell'impatto del 10% per HI5 e del 20% per HI10. Tuttavia, in altre categorie di impatto, come il cambiamento climatico, l'eutrofizzazione delle acque dolci, l'assottigliamento dell'ozono e l'uso di risorse fossili, i mangimi con insetti presentano impatti leggermente superiori, seppur con differenze contenute (inferiori al 10%).

Queste variazioni limitate sono comunque incoraggianti, considerando che la produzione della farina di insetto è attualmente su scala sperimentale. Con l'aumento della scala produttiva, sarà possibile ottimizzare i processi e ridurre i consumi energetici, con potenziali benefici anche per le performance ambientali complessive della farina di insetto

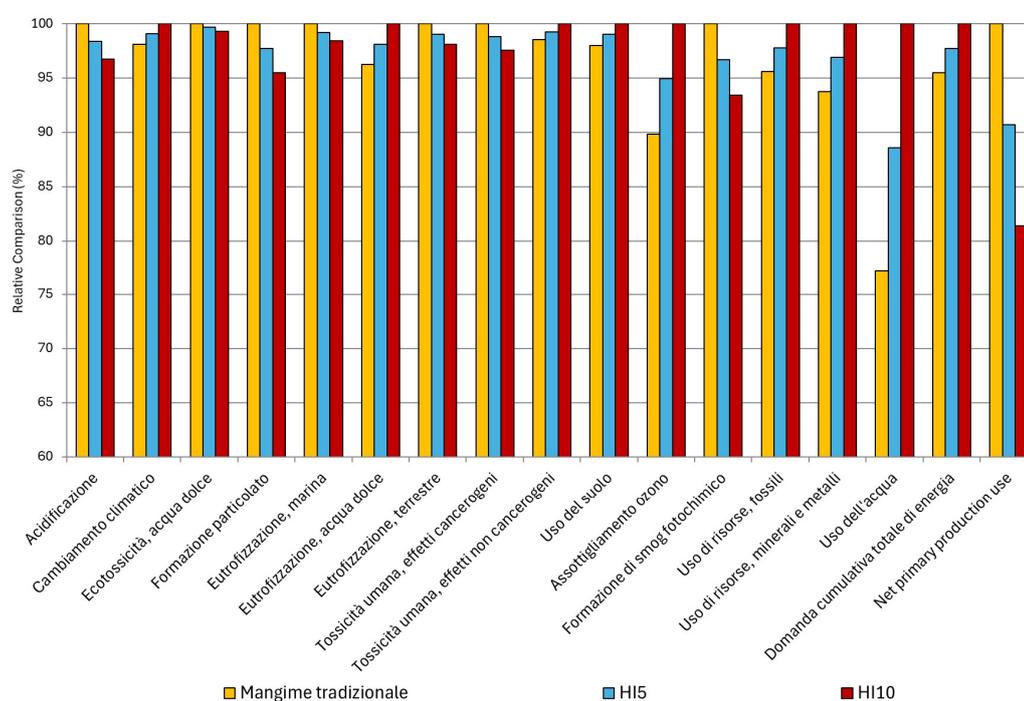


Figura 3. Confronto relativo tra il mangime tradizionale e i mangimi contenenti 5% (HI5) e 10% (HI10) di farina di insetto. Per ogni categoria di impatto, il caso con l'impatto più alto è posto uguale a 100, mentre gli altri due casi sono scalati proporzionalmente.

3. Conclusioni

Questo studio ha permesso di quantificare e caratterizzare l'impatto ambientale di un allevamento di trote tradizionale, fornendo un benchmark utile per future valutazioni nell'ambito del progetto newRIFF. Il confronto tra i mangimi ha evidenziato differenze contenute negli impatti ambientali, con alcune categorie a favore della farina di insetto e altre leggermente sfavorevoli. Tuttavia, la produzione di farina di insetto è attualmente su scala sperimentale, e un'ottimizzazione su scala industriale potrebbe migliorare significativamente le sue performance ambientali.

I prossimi step prevedono prove sperimentali di accrescimento delle trote con i mangimi contenenti farina di insetto. Questo permetterà di valutare l'intero ciclo di vita, fino alla

produzione del pesce, e di comprendere eventuali differenze nell'accrescimento degli animali, aspetto fondamentale anche per quantificare i potenziali benefici ambientali dell'utilizzo della farina di insetto.

Ringraziamenti

Il presente studio è stato finanziato all'interno del progetto newRIFF (New life for Rice by-products and agricultural wastes: Insects bioconversion for Fish Feed production), finanziato dalla Fondazione CARIPOLO nell'ambito del programma Circular Economy – Promoting research for a sustainable future – 2022.

4. Bibliografia

- Aubin, J., Papatryphon, E., Van der Werf, H. M. G., & Chatzifotis, S. (2009). Assessment of the environmental impact of carnivorous finfish production systems using life cycle assessment. *Journal of Cleaner production*, 17(3), 354-361.
- Bureau, D. P., & Hua, K. (2010). Towards effective nutritional management of waste outputs in aquaculture, with particular reference to salmonid aquaculture operations. *Aquaculture Research*, 41(5), 777-792. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2009.02431.x>
- Dekamin, M., Veisi, H., Safari, E., Liaghati, H., Khoshbakht, K., & Dekamin, M. G. (2015). Life cycle assessment for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) production systems: a case study for Iran. *Journal of Cleaner Production*, 91, 43-55.
- Ermolaev, E., Lalander, C., & Vinnerås, B. (2019). Greenhouse gas emissions from small-scale fly larvae composting with *Hermetia illucens*. *Waste Management*, 96, 65-74.
- Papatryphon, E., Petit, J., Kaushik, S. J., & Van Der Werf, H. M. (2004). Environmental impact assessment of salmonid feeds using life cycle assessment (LCA). *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 33(6), 316-323.
- Pouil, S., Besson, M., Phocas, F., & Aubin, J. (2024). Assessing the environmental impacts of conventional and organic scenarios of rainbow trout farming in France. *Journal of Cleaner Production*, 456, 142296.
- Samuel-Fitwi, B., Nagel, F., Meyer, S., Schroeder, J. P., & Schulz, C. (2013). Comparative life cycle assessment (LCA) of raising rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) in different production systems. *Aquacultural Engineering*, 54, 85-92.
- Smetana, S., Schmitt, E., & Mathys, A. (2019). Sustainable use of *Hermetia illucens* insect biomass for feed and food: Attributional and consequential life cycle assessment. *Resources, Conservation and Recycling*, 144, 285-296.