“Economia, esternalità ambientali e policies del settore della mitilicoltura in Italia: attività di supporto istituzionale e tecnico-scientifico per l’attuazione del Piano strategico per l’acquacoltura 2014-2020”

ACRONIMO
VALUESHELL

COORDINATORE
Consiglio per la Ricerca in Agricoltura e l’Analisi dell’Economia Agraria (CREA), Centro di ricerca Politiche e Bio-economia (PB)

RESPONSABILE SCIENTIFICO
Dott.ssa Lucia Tudini
Telefono: 055-3241752, 3398447949
e-mail: lucia.tudini@crea.gov.it

U.U.O.O.
Consiglio per la Ricerca in Agricoltura e l’Analisi dell’Economia Agraria (CREA), Centro di ricerca Politiche e Bio-economia (PB) – Responsabile Dott.ssa Lucia Tudini
Consiglio per la Ricerca in Agricoltura e l’Analisi dell’Economia Agraria (CREA), Centro di ricerca Zootecnia e Acquacoltura (ZA) – Responsabile Dott.ssa Domitilla Pulcini (domitilla.pulcini@crea.gov.it)

1. Premessa

Nella "DESCRIZIONE GENERALE DEL PROGETTO" (vedi Progetto esecutivo, p. 9), si riporta, tra gli obiettivi specifici del progetto, quello di "*valutare gli impatti ambientali associati alla mitilicoltura*". Poiché tale obiettivo scientifico è stato ampiamente raggiunto nel corso del progetto AQUACULTURE2020, per fornire un quadro ancora più ampio degli impatti associati alla filiera molluschicola italiana, le attività del **Modulo 2** "Quantificazione delle esternalità positive sull'ambiente" si sono concentrate anche sulla venericoltura. Inoltre, per completare l'analisi di settore con la terza specie di interesse commerciale, è stato realizzato un *focus* specifico sull'ostricoltura.

2. Modulo 2 – Quantificazione delle esternalità positive sull'ambiente (U.O. CREA-ZA)

Il **Modulo 2** ha previsto la messa a punto e l'utilizzo di un modello di *Life Cycle Assessment* (LCA), come strumento per valutare gli impatti ambientali, nonché le esternalità positive sull'ambiente, associati alla molluschicoltura (venericoltura e ostricoltura), attraverso l'identificazione e la quantificazione dei consumi e dei flussi in entrata e in uscita di materia, risorse, energia, rifiuti ed emissioni nell'ambiente, permettendo di identificare e valutare potenziali *hotspot* di filiera ove è possibile intervenire al fine di ridurre tali impatti.
L'utilizzo dell'approccio di *Life Cycle Assessment* (LCA) per la quantificazione degli impatti ambientali secondo gli standard ISO 14040/2006 e 14044/2006 è stato utilizzato unitamente alla valutazione della molluschicoltura come *carbon storage/sink*. Una delle ipotesi che questa attività progettuale ha inteso verificare è se i molluschi bivalvi allevati possano svolgere un ruolo nel sequestro di anidride carbonica a lungo termine, in virtù della loro capacità di immagazzinare carbonio sotto forma di carbonato di calcio durante il processo di biocalcificazione che porta alla formazione della conchiglia. Essendo questo processo determinato non solo da caratteristiche biologiche della specie, ma anche da diversi parametri ambientali, il progetto ha previsto il monitoraggio e la raccolta dei dati ambientali di interesse relativi ai siti di allevamento attraverso la piattaforma AQUAX (ColomboSky), basata sulla combinazione di dati satellitari e di modelli oceanografici locali di circolazione delle correnti costiere, approccio combinato che ha consentito di ottenere una risoluzione spaziale molto dettagliata.

2.1 Attività svolte

2.2.1 Quantificazione delle esternalità della filiera della venericoltura sull'ambiente - Selezione delle aziende

Attività 2.1 Identificazione dei siti e delle aziende produttrici idonee all'applicazione di modelli di LCA sulla base delle informazioni a disposizione (storico delle produzioni, tipologia di allevamento, dati ambientali, certificazioni ambientali e di processo) al fine di confrontare tipologie e modelli aziendali che si differenziano per tecniche di allevamento e contesto ambientale.

Le specie selezionate nell'ambito del progetto sono state:

1) La vongola verace filippina (*Ruditapes philippinarum*), di cui l'Italia è primo produttore in Europa, rappresentando il 96% delle produzioni europee in volume (23.053,2 tonnellate nel 2021). In Italia, si calcola per la produzione di vongola verace filippina un valore di circa 211.812.802 € (2021). Di questa specie, si riportano i risultati in maniera più approfondita, poiché i casi di studio in oggetto sono stati analizzati per la prima volta.
2) Il mitilo mediterraneo (*Mytilus galloprovincialis*).
3) L'ostrica concava giapponese (*Crassostrea gigas*).

La **filiera della venericoltura** si articola in quattro fasi principali:

1. reperimento del seme in natura o produzione del seme da riproduttori selezionati in strutture dedicate, dette schiuditoi;
2. fase di ingrasso/allevamento (accrescimento del prodotto fino alla taglia commerciale);
3. fase di raccolta del prodotto;
4. fase di depurazione.

Le aziende selezionate per lo studio sono localizzate nell'area costiera dell'alto Adriatico a ridosso del Delta del Po (Figura 2.1), data forte vocazione di quest'area per la molluschicoltura, e per la venericoltura (*R. philippinarum*) in particolare. Infatti, quest'area geografica è caratterizzata dalla presenza di una vasta zona di acque di transizione, particolarmente adatte all'allevamento dei bivalvi fossori.

Sono stati selezionati tre impianti sulla base dei metodi di allevamento/raccolta del prodotto, scegliendone due che applicano metodi convenzionali e uno che produce vongole biologiche acquistando seme da schiuditoio.

L'allevamento della vongola verace filippina si svolge sempre in aree di produzione di classe B (Reg. UE 627/2019). Pertanto, il prodotto deve sempre essere sottoposto al processo di depurazione prima della commercializzazione.

Le aziende/filiere selezionate sono:

A. **Consorzio Cooperative Pescatori del Polesine O.P. S.C.Ar.L.** che opera nella Sacca di Scardovari (Porto Tolle, RO, Veneto). Nell'ambito delle attività consortili si svolgono le operazioni di reperimento del seme selvatico, semina e allevamento, raccolta e successiva depurazione.
B. **Consorzio Pescatori di Goro (Copego)** che opera nella Sacca di Goro (Goro, FE, Emilia-Romagna). Nell'ambito delle attività consortili si svolgono le operazioni di reperimento seme selvatico, semina e allevamento, raccolta e successiva depurazione.
C. Filiera di produzione della vongola biologica composta dalle aziende **Naturedulis - Società Cooperativa Gorino - Finittica**, che opera nella Sacca di Goro (Goro, FE, Emilia-Romagna), nei seguenti settori:
    i. **Naturedulis**, specializzata nella produzione del seme (schiuditoio);
    ii. **Società Cooperativa Gorino**, ingrasso e raccolta del prodotto biologico;
    iii. **Finittica**, depurazione del prodotto finale.

I referenti dei suddetti segmenti di filiera si sono resi disponibili alla collaborazione con il Centro di Ricerca Zootecnia e Acquacoltura del CREA per la raccolta dei dati necessaria alla creazione del modello di LCA per la valutazione dell'impatto ambientale.

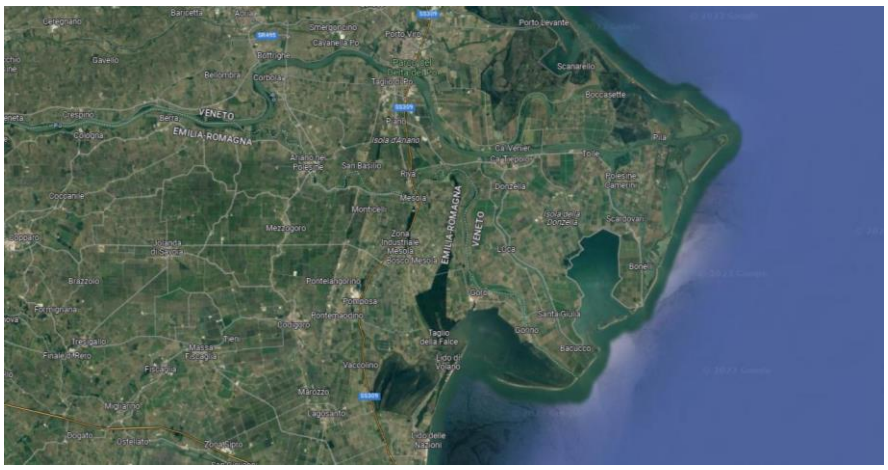


Figura 2.1 Area di indagine del presente studio, dove insistono gli impianti di venericoltura selezionati per LCA.

2.2.2 Preparazione dei questionari per il reperimento dei dati foreground necessari per la stesura del Life Cycle Inventory e quantificazione delle esternalità positive sull'ambiente

Attività 2.2 Raccolta dei dati "foreground" (riguardanti le attività direttamente misurabili dal produttore) e di "background" (non misurabili direttamente).

Per la valutazione delle performance ambientali delle filiere selezionate è stata adottata la metodologia del *Life Cycle Assesment*.
Essa prevede quattro fasi:

1. definizione di obiettivi e ambito;
2. compilazione dell'inventario;
3. valutazione degli impatti;
4. interpretazione.

L'obiettivo di questo studio è documentare le performance ambientali e identificare potenziali aree di miglioramento di tre filiere produttive di vongola verace filippina site nelle zone costiere dell'alto Adriatico. Unitamente alla valutazione delle emissioni derivanti dai processi produttivi, sono stati analizzati, con l'ausilio dei dati ambientali reperiti tramite la piattaforma AQUAX (ColomboSky), i flussi di carbonio biogenico derivanti dai processi di biocalcificazione per la formazione della conchiglia dei molluschi. L'ambito dello studio è l'analisi dei flussi di materia ed energia che attraversano il sistema di produzione nelle fasi di reperimento del seme o sua produzione in schiuditoi, fase di ingrasso/allevamento, raccolta e depurazione. Si è scelto di utilizzare l'analisi "dalla culla al cancello" (*from cradle-to-gate*), ovvero dalla fase di reperimento seme (selvatico o da schiuditoio) a quella di depurazione e packaging.
Per la stesura del *Life Cycle Inventory* (LCI), a seguito di colloqui telefonici necessari per comprendere la complessità del processo produttivo della vongola verace, sono stati elaborati dei questionari preliminari da sottoporre agli intervistati per reperire i dati *foreground*. I questionari sono specifici per ogni segmento di filiera e sono riportati in allegato (Allegato LCA). Inoltre, in accordo con i referenti delle aziende coinvolte, sono stati effettuati dei sopralluoghi presso gli impianti (dicembre 2021, maggio e settembre 2022), seguiti da ulteriori momenti di confronto con gli allevatori, al fine di verificare insieme agli intervistati le informazioni preliminari ricevute attraverso i questionari, visionare gli impianti e valutare la necessità di eventuali informazioni aggiuntive da reperire al fine di effettuare un'analisi puntuale delle performance ambientali della filiera.
Per i dati *background* sono stati utilizzati specifici database (es: Ecoinvent), letteratura e informazioni da esperti. È stato considerato l'End-of-Life di tutti i materiali.

I confini del sistema generalizzati definiti per l'analisi della filiera della venericoltura dell'alto Adriatico sono riportati in Figura 2.2 e comprendono le fasi di:

1. reperimento/produzione del seme e fase di pre-ingrasso;
2. semina del prodotto giovanile nei vivai e fase di ingrasso fino a taglia commerciale (incluse tutte le procedure di monitoraggio dell'accrescimento del prodotto, riduzione delle densità e operazioni di pulizia dei siti di allevamento);
3. fase di raccolta del prodotto di taglia commerciale;
4. fase di depurazione per l'ottenimento del prodotto pronto alla vendita.

All'interno dei confini del sistema è incluso anche il processo di biocalcificazione.

Per il *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA) è stato utilizzato il software Simapro (v. 9.5.0.1) ed il metodo ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.08 / World (2010) H.

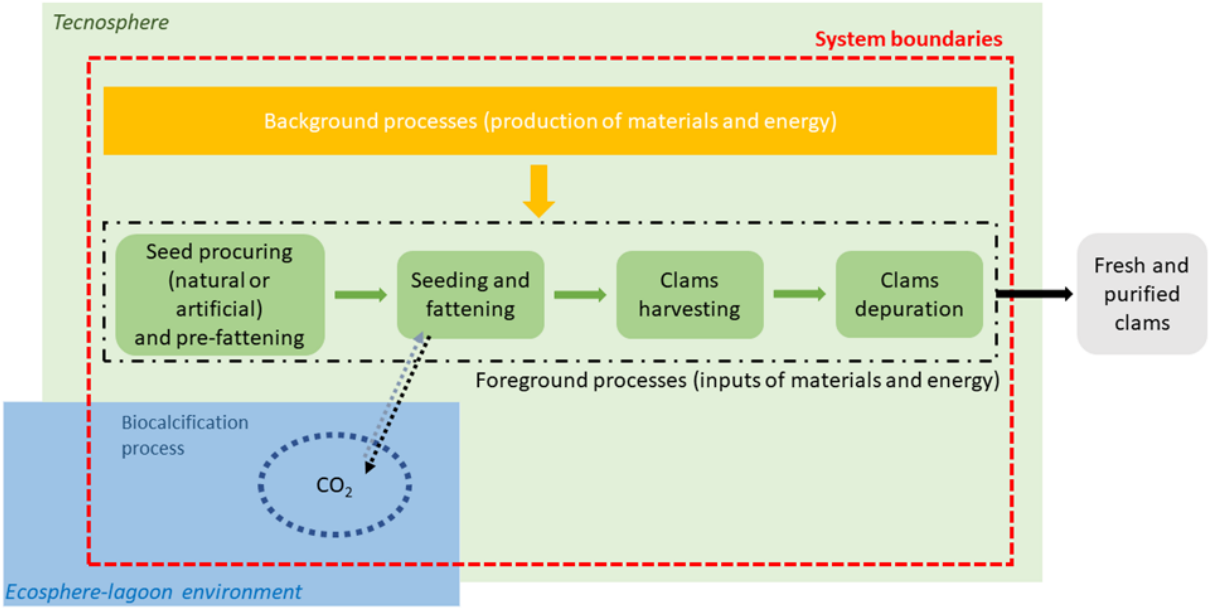


Figura 2.1. Generalizzazione dei confini del sistema per la creazione del modello LCA applicato alla filiera di venericoltura dell'alto Adriatico.

2.2.3 Calcolo dei flussi di carbonio biogenico

Il flusso di carbonio biogenico preso in considerazione è quello relativo al processo di biocalcificazione necessario alla formazione della conchiglia dei molluschi (Eq. 1). I flussi di carbonio relativi alla respirazione sono stati esclusi dall'analisi. Inoltre, essi possono essere considerati parte del ciclo breve del carbonio, ovvero reimmessi velocemente nel ciclo attraverso il metabolismo degli animali e riutilizzati nei processi di fotosintesi dal fitoplancton.
In Eq. 2 è riportata la formula per il calcolo della quantità di carbonio biogenico rilasciato durante la formazione della conchiglia.

Eq.1 *CO_2 sequestrata= massa $CaCO_3$ conchiglia x massa molare CO_2 /massa molare $CaCO_3$*
Eq.2 *CO_2 rilasciata = massa conchiglia x Ψ x % $CaCO_3$ conchiglia x (massa molare CO_2/massa molare $CaCO_3$)*

I parametri ambientali necessari per il calcolo dell'anidride carbonica rilasciata durante il processo di biocalcificazione (Eq. 2), specifici per ogni sito, sono stati reperiti dalla piattaforma AQUAX (ColomboSky) e mediante analisi specifiche svolte in laboratorio. Il dato inerente alla massa della conchiglia (espresso in kg) è stato rilevato specificatamente per ogni sito. Il parametro *Ψ* corrisponde al rapporto tra CO_2 rilasciata e $CaCO_3$ precipitato è stato calcolato per ogni sito oggetto di studio attraverso il pacchetto R "seacarb" con l'utilizzo dei dati derivanti dal monitoraggio ambientale della piattaforma AQUAX. Anche la percentuale del carbonato di calcio della conchiglia è stata calcolata sperimentalmente in laboratorio attraverso calcimetria per i campioni di vongole provenienti dai siti oggetto di studio.

Attività 2.3 Messa a punto di un modello di LCA, implementato mediante programma SimaPro. L'analisi restituirà un modello di *Life Cycle Assessment* che permetterà di quantificare il valore aggiunto in termini ambientali delle aziende selezionate. Inoltre, si descriveranno qualitativamente i servizi ecosistemici forniti dalle aziende "modello" selezionate.

Per la messa a punto del modello di LCA è stato utilizzato il software Simapro (versione 9.5.0.1). L'integrazione del modello di LCA con il calcolo della CO_2 sequestrata all'interno della conchiglia durante la sua formazione ha inoltre consentito di quantificare questo servizio ecosistemico fornito dalla venericoltura per le aziende selezionate.

2.2.4 Implementazione del modello di LCA – risultati

Come precedentemente riportato, le filiere identificate come casi studio in questo progetto sono:

- **CS-A**: Consorzio Cooperative Pescatori del Polesine,
- **CS-B**: Consorzio Pescatori Goro,
- **CS-C**: Filiera Naturedulis-Cooperativa Gorino-Finittica.

L'unità funzionale scelta è **1 kg di vongola allevata e depurata**, pronta alla vendita.
Il prodotto allevato dai Consorzi Cooperative Pescatori del Polesine e Pescatori Goro nelle aree della Sacca di Scardovari e della Sacca di Goro, rispettivamente, deriva per la quasi totalità (>95-99%) dalla semina di seme selvatico raccolto nelle aree di *nursery* identificate nelle sacche stesse. Nell'anno di riferimento, infatti, solo piccole quantità di seme venivano acquistate da schiuditoi esteri. Pertanto, per questi due casi studio, l'acquisto di seme da schiuditoio non è stato incluso nelle analisi, in quanto gli impatti derivanti sono stati considerati irrilevanti e perché non si disponeva di dati specifici sugli impianti di produzione di seme situati all'estero.
Dopo la fase di allevamento/ingrasso, il prodotto di taglia commerciale viene trasportato al CDM (Centro Depurazione Molluschi). Qui, una parte del prodotto viene depurata presso l'impianto, mentre una parte viene inviata a CDM limitrofi. La valutazione degli impatti ambientali è stata condotta per il prodotto depurato e confezionato nel CDM di riferimento della filiera locale.
Per quanto riguarda il prodotto della filiera Naturedulis-Cooperativa Gorino-Finittica, classificato come vongola verace biologica, esso deriva 100% da seme prodotto nell'unico schiuditoio italiano, Naturedulis. Il seme viene poi seminato nei vivai in gestione alla Cooperativa Gorino. Il prodotto giunto a taglia commerciale viene raccolto ed inviato al CDM Finittica.
Le fasi di allevamento della vongola verace filippina (dalla semina alla raccolta del prodotto di taglia commerciale) hanno la durata di circa 24 mesi.
In questo lavoro sono state considerate tutte le categorie d'impatto. Tuttavia, nella presente relazione sono presentate solamente quelle più attinenti alla filiera (Global warming, Freshwater Ecotoxicity, Marine Ecotoxicity, Human Carcinogenic toxicity e Fossil Resource Scarcity). I risultati riferiti a tutte le categorie di impatto sono comunque riportati nell'Allegato LCA.

CS-A: Caso studio Consorzio Cooperative Pescatori del Polesine

In Tabella 2.1 e Figura 2.3 sono riportati i risultati della valutazione di impatto ambientale e dell'analisi dei contributi per il caso studio CS-A.

Tabella 2.1 Valutazione di impatto ambientale del caso studio CS-A per la produzione di 1 kg di vongola allevata e depurata.

Categoria d'impatto	*Unità*	*Totale*	*Allevamento*	*Depurazione*
Global warming	kg CO2 eq	0,9949811	0,8849537	0,1100275
Freshwater ecotoxicity	kg 1.4-DCB	0,0000007	0,0000006	0,0000001

Marine ecotoxicity	kg 1.4-DCB	0,0258723	0,0131570	0,0127153
Human carcinogenic toxicity	kg 1.4-DCB	0,0013254	0,0011270	0,0001984
Fossil resource scarcity	kg oil eq	0,0006800	0,0005643	0,0001157

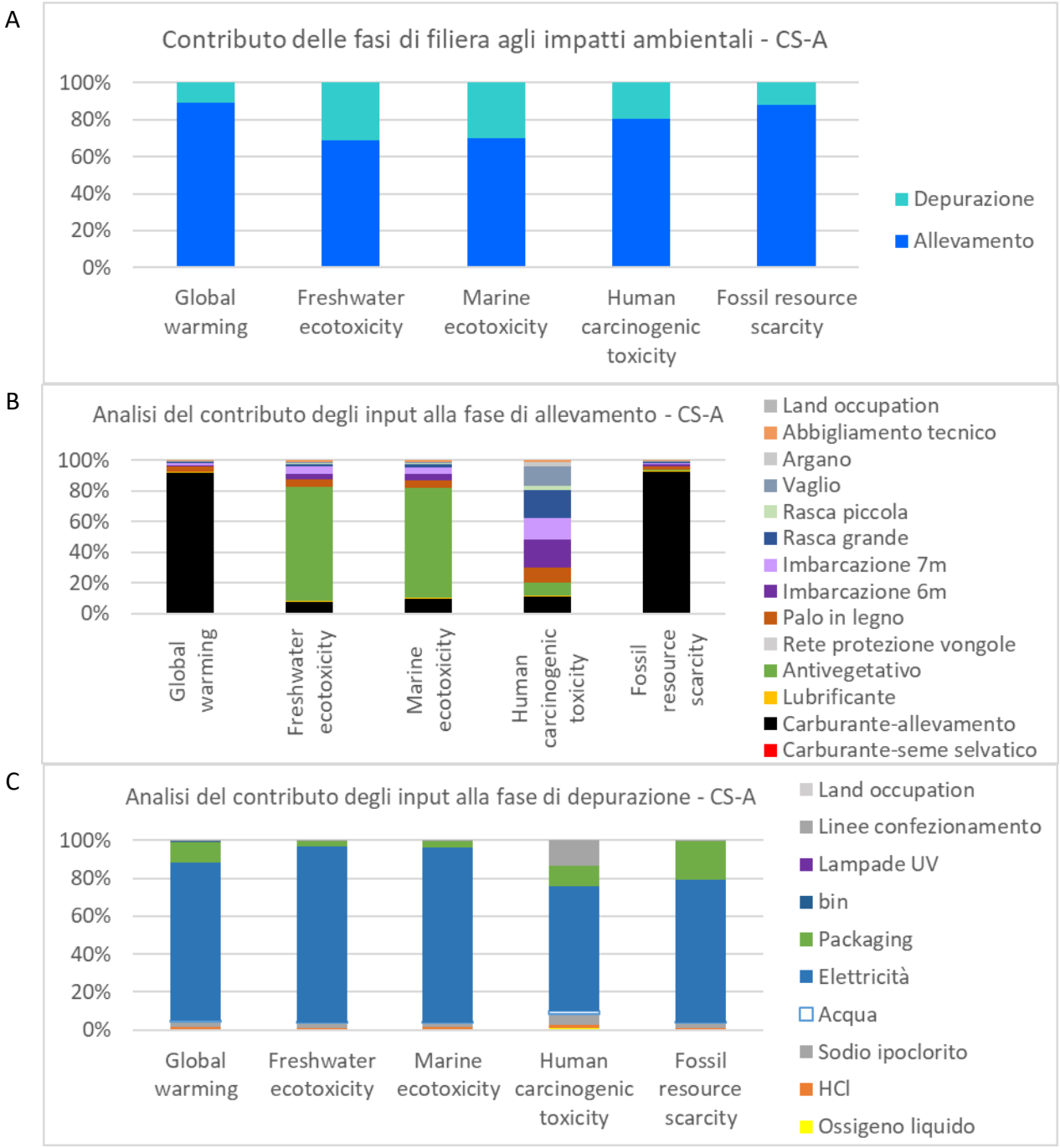


Figura 2.3 A-C Analisi del contributo agli impatti totali dei due segmenti della filiera CS-A.

La fase di allevamento rappresenta il segmento di filiera che contribuisce maggiormente (dal 70 al 90%) a tutte le categorie di impatto selezionate (Figura 2.3 A).
Questa fase è infatti caratterizzata dall'utilizzo di carburante (gasolio) per le attività di gestione del vivaio, riduzione delle densità delle vongole allevate e attività di raccolta; input che contribuisce per più del 90% degli impatti associati alle categorie di impatto Global Warming e Fossil Resource

Scarcity (Figura 2.3 B). I componenti della vernice antivegetativa utilizzata risultano invece essere i maggiori driver degli impatti per le categorie Freshwater and Marine Ecotoxicity (circa 70% degli impatti) (Figura 2.3 B). Per quanto riguarda la categoria di impatto Human Carcinogenic Toxicity, diversi input contribuiscono più o meno equamente al risultato: attrezzature in acciaio (rasche e vagli) e le imbarcazioni (in legno e vetroresina) (Figura 2.3 B).
Relativamente alla fase di depurazione del prodotto, l'utilizzo di corrente elettrica rappresenta l'input che contribuisce maggiormente a tutti gli impatti analizzati nel caso della depurazione in CDM di Scardovari (Figura 2.3 C). È importante notare che anche attrezzatura in acciaio e utilizzo di packaging plastico contribuisce leggermente agli impatti associati alla categoria Human carcinogenic activity.

Nota: Per questo caso studio è stato possibile ottenere il dato relativo al consumo di carburante associato alla sola attività di reperimento seme selvatico. Non essendo possibile quantificare la quantità di seme raccolto per mancanza di dati, non è stato possibile determinare la percentuale di allocazione di altri input alla fase di reperimento del seme che risultano essere condivisi con la fase di allevamento (imbarcazioni, vernici antivegetative, macchinari e attrezzature etc.).
Gli impatti associati al consumo di carburante dedicato a questa attività sono pari allo 0.5% degli impatti relativi al Global Warming dell'intera filiera (0.6% della fase di allevamento) e corrispondono a circa 0.005 kg CO_2 eq/kg di prodotto allevato e depurato.

Da questa analisi, i principali **hotspot** della filiera della venericoltura della Sacca di Scardovari risultano essere il consumo di *carburante* (gasolio) per le operazioni in mare relative alla fase di ingrasso/allevamento, il consumo di *elettricità da rete nazionale* per le fasi di depurazione.

CS-B: Caso studio Consorzio Pescatori Goro

In Tabella 2.2 e Figura 2.4 sono riportati i risultati della valutazione di impatto ambientale per il caso studio CS-B.

Tabella 2.2 Valutazione di impatto ambientale del caso studio CS-B per la produzione di 1 kg di vongola allevata e depurata.

Categoria d'impatto	***Unità***	***Totale***	***Allevamento***	***Depurazione***
Global warming	kg CO2 eq	0,841	0,723	0,118
Freshwater ecotoxicity	kg 1.4-DCB	0,023	0,011	0,011
Marine ecotoxicity	kg 1.4-DCB	0,029	0,015	0,014
Human carcinogenic toxicity	kg 1.4-DCB	0,022	0,014	0,008
Fossil resource scarcity	kg oil eq	0,244	0,208	0,036

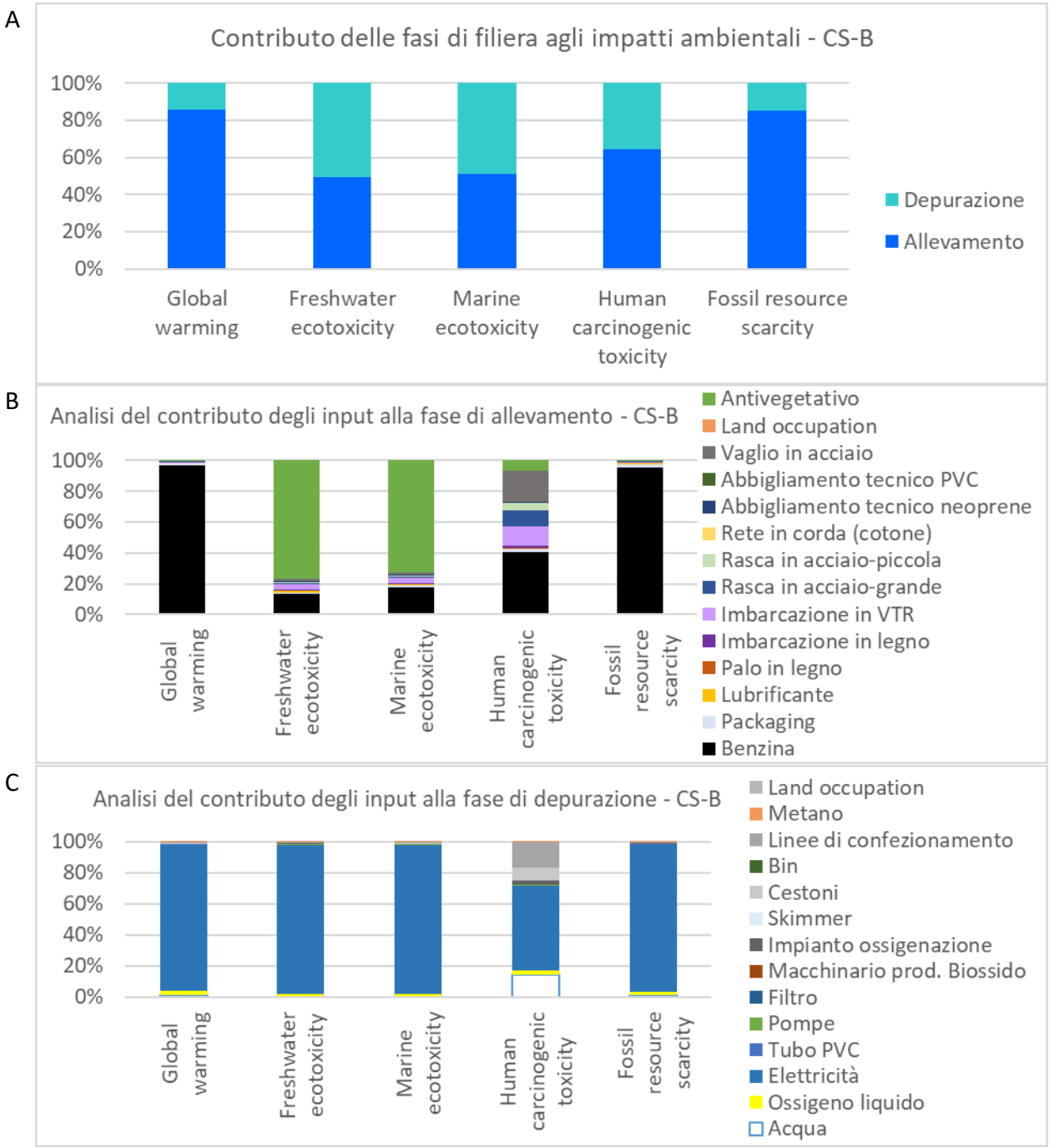


Figura 2.4 A-C Analisi del contributo agli impatti totali dei due segmenti della filiera CS-B.

Anche per questo caso studio, la fase di allevamento rappresenta il segmento di filiera che contribuisce maggiormente (circa 85%) alle categorie di impatto Global warming e Fossil resource scarcity (Figura 2.4 A). Per le categorie di impatto Freshwater ecotoxicity, Marine ecotoxicity e Human carcinogenic toxicity invece i due segmenti di filiera contribuisco equamente agli impatti.
La fase di allevamento ha come driver principale di impatti associati al Global Warming e Fossil resource scarcity (contribuendo per più del 90% degli impatti) il consumo di carburante necessario per le attività di gestione del vivaio, riduzione delle densità delle vongole allevate e attività di raccolta (Figura 2.4 B). Circa l'80% degli impatti associati alle categorie Freshwater e Marine ecotoxicity sono dovute all'utilizzo di antivegetativo (Figura 2.4 B). Per quanto riguarda la categoria di impatto Human Carcinogenic Toxicity, diversi input contribuiscono più o meno equamente al

risultato: attrezzature in acciaio (rasche e vagli, circa 50% degli impatti) e imbarcazioni (in legno e vetroresina, circa 20% degli impatti) (Figura 2.4 B).
Relativamente alla fase di depurazione del prodotto nel CDM di Goro, l'utilizzo di corrente elettrica rappresenta l'input che contribuisce maggiormente (>95%) a tutti gli impatti analizzati, ad eccezione della categoria Human carcinogen toxicity, per la quale anche l'utilizzo di metano e acqua rivestono un certo contributo (Figura 2.4 C).

Da questa analisi, i principali **hotspot** della filiera della venericoltura della Sacca di Goro risultano essere il consumo di carburante (benzina) per le operazioni in mare relative alla fase di ingrasso/allevamento, il consumo di elettricità da rete nazionale per le fasi di depurazione.

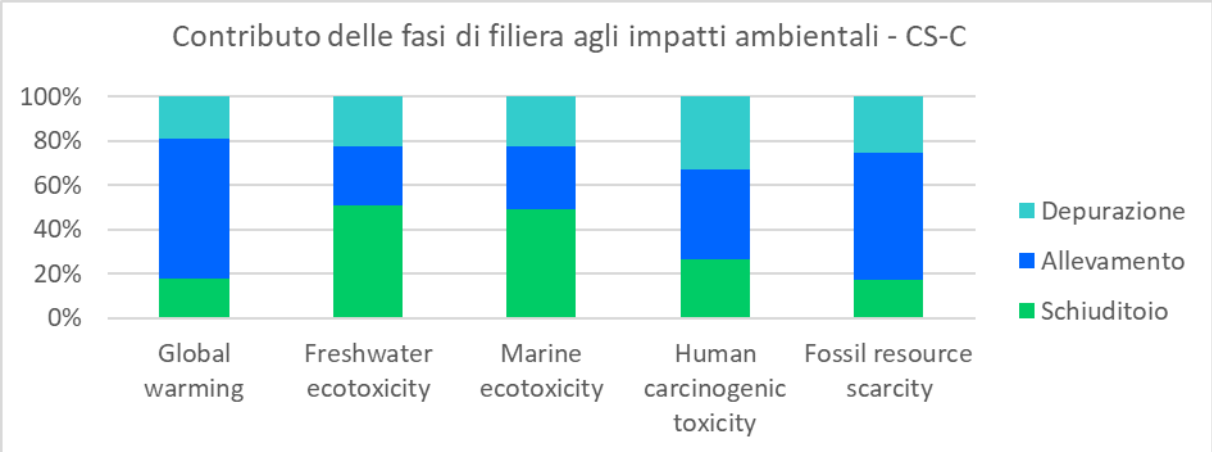
CS-C: Caso studio filiera Naturedulis-Cooperativa Gorino-Finittica

In Tabella 2.3 e Figura 2.5 sono riportati i risultati della valutazione di impatto ambientale per il caso studio CS-C.

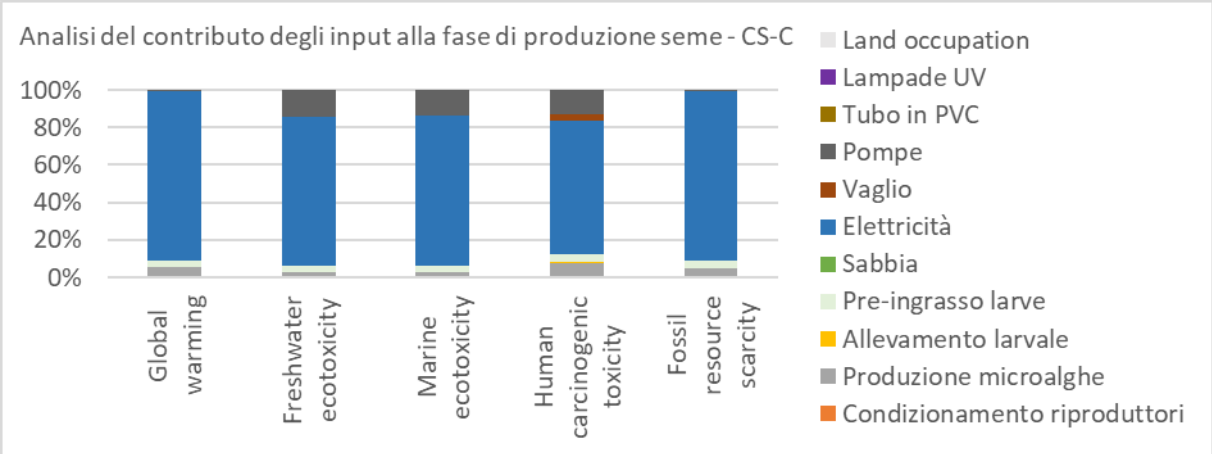
Tabella 2.3 Valutazione di impatto ambientale del caso studio CS-C per la produzione di 1 kg di vongola da seme di schiuditoio, allevata e depurata.

Categoria d'impatto	*Unità*	*Totale*	*Schiuditoio*	*Allevamento*	*Depurazione*
Global warming	kg CO2 eq	2,862499	0,51319	1,812357	0,536951
Freshwater ecotoxicity	kg 1.4-DCB	0,113665	0,057463	0,030645	0,025557
Marine ecotoxicity	kg 1.4-DCB	0,146767	0,071846	0,041697	0,033224
Human carcinogenic toxicity	kg 1.4-DCB	0,090093	0,024076	0,036481	0,029536
Fossil resource scarcity	kg oil eq	0,900296	0,156959	0,515462	0,227876

A



B



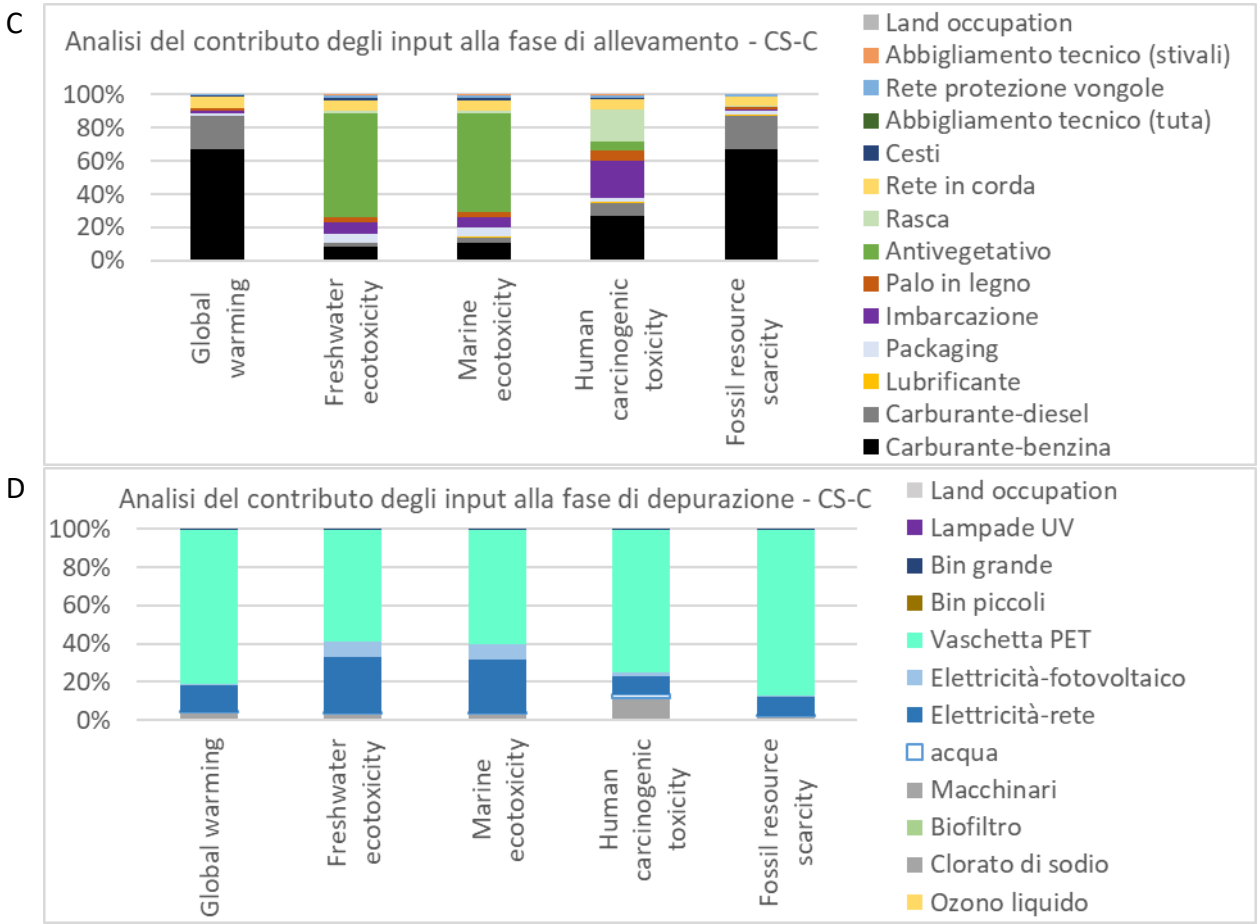


Figura 2.5 A-D Analisi del contributo agli impatti totali dei tre segmenti della filiera CS-C.

Anche per questo caso studio, la fase di allevamento rappresenta il segmento di filiera che contribuisce maggiormente (circa 60%) alle categorie di impatto Global warming e Fossil resource scarcity (Figura 2.5 A). Per le categorie di impatto Freshwater ecotoxicity e Marine, la fase di produzione seme in schiuditoio è risultata essere quella che contribuisce maggiormente agli impatti (circa il 50%), mentre le fasi di allevamento e depurazione vi contribuisco per circa il 25% ciascuna. Infine, la fase che contribuisce maggiormente alla categoria di impatto Human carcinogenic toxicity è la fase di depurazione e packaging del prodotto finale (circa il 60%).

L'input che determina maggiormente il risultato per tutte le categorie d'impatto per la fase di produzione di seme in schiuditoio è l'utilizzo di energia elettrica da rete nazionale (80-90%) (Figura 2.5 B). Per la fase di allevamento (Figura 2.5 C), il carburante (sia benzina che gasolio) è nuovamente l'input che contribuisce maggiormente (90%) agli impatti associati alle categorie Global warming e Fossil resource scarcity; mente per le categorie di impatto Freshwater e Marine ecotoxicity il contributo maggiore è dato dall'utilizzo dell'antivegetativo (60%). Infine, carburante (35%), imbarcazioni (20%) e attrezzatura in acciaio (20%) determinano i maggiori contributi agli impatti relativi alla categoria Human carcinogenic toxicity.

Relativamente alla fase di depurazione del prodotto nel CDM Finittica (Figura 2.5 D), contrariamente a quanto osservato negli altri casi studio, l'input che contribuisce maggiormente a tutte le categorie di impatto (60-90%) è l'utilizzo di vaschette in PET, seguito dall'utilizzo di corrente elettrica.

Nota: Il caso studio CS-C riguarda la particolare filiera della vongola verace biologica. Il prodotto venduto come biologico, una volta depurato, viene confezionato esclusivamente in vaschette in PET, mentre il prodotto convenzionale viene commercializzato nelle classiche retine in PE.
È inoltre importante notare che l'impianto di depurazione Finittica è dotato di un sistema di produzione di energia fotovoltaica, a supporto del consumo di elettricità da rete nazionale.

I principali **hotspot** della filiera della venericoltura biologica della Sacca di Goro risultano essere l'utilizzo di energia elettrica da rete nazionale per la fase di produzione del seme, il consumo di carburante (benzina e gasolio) per le operazioni in mare relative alla fase di ingrasso/allevamento, l'utilizzo di vaschette in PET per il confezionamento delle vongole biologiche per la fase di depurazione e packaging.

Analisi di scenario per il caso studio CS-C

Sono state condotte delle analisi di scenario per il CS-C, trattandosi del caso studio che presenta i maggiori impatti ambientali. Le analisi di scenario permettono di quantificare i potenziali benefici che si verificherebbero se si adottassero strategie aziendali differenti da quelle attualmente in uso. Si sono quindi ipotizzati i seguenti scenari:

1. Per la fase di allevamento, utilizzo di reti per rasche in cotone al posto di quelle in nylon.
2. Per la fase di allevamento, una Fuel Use Intensity (FUI, ovvero kg di carburante per kg di vongola raccolta) pari a quella riscontrata negli altri due casi studio (FUI 0,1 kg di carburante/kg vongola); ovvero ottimizzazione delle uscite in barca ed efficientamento delle imbarcazioni. La FUI riscontrata per il CS-C è pari a 0,2.
3. Per la fase di depurazione e packaging, utilizzo di classiche retine in polietilene (PE) al posto delle vaschette in polietilene tereftalato (PET) per il confezionamento.

Come si può osservare dai risultati riportati di seguito (Tabelle 2.4-2.6, Figure 2.6-2.8), specificatamente per il CS-C, le strategie migliori per abbassare gli impatti ambientali sono l'ottimizzazione nell'utilizzo di carburante e la conversione del packaging da vaschetta in PET a retina in PE.

Scenario 1: sostituzione delle reti delle rasche in nylon con reti in cotone

Tabella 2.4 Analisi di scenario-Life cycle impact assessment: sostituzione delle reti delle rasche in nylon con reti in cotone

Categoria d'impatto	***Unità***	*Rete in nylon*	*Rete in cotone*
Global warming	kg CO2 eq	2,862499	2,809868
Freshwater ecotoxicity	kg 1.4-DCB	0,113665	0,118282
Marine ecotoxicity	kg 1.4-DCB	0,146767	0,150391
Human carcinogenic toxicity	kg 1.4-DCB	0,090093	0,09062
Fossil resource scarcity	kg oil eq	0,900296	0,882381

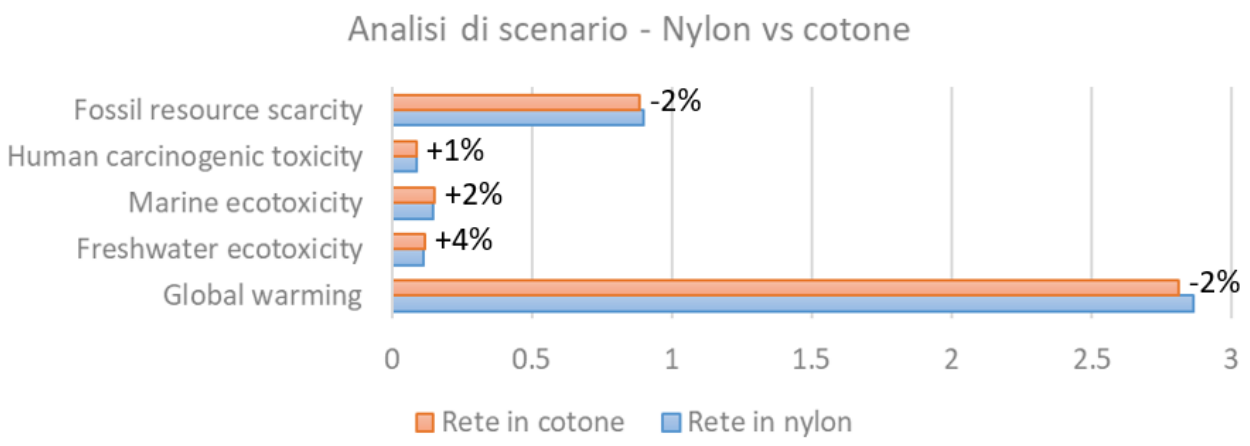


Figura 2.6 Analisi di scenario-Life cycle impact assessment: sostituzione delle reti delle rasche in nylon con reti in cotone. Le percentuali indicano la diminuzione o l'aumento degli impatti che si avrebbe adottando la strategia alternativa.

Scenario 2: ottimizzazione nell'utilizzo di carburante

Tabella 2.4 Analisi di scenario-Life cycle impact assessment: ottimizzazione nell'utilizzo di carburante.

Categoria d'impatto	***Unità***	*FUI dichiarata*	*FUI 0,1*
Global warming	kg CO2 eq	2,862499	2,171156
Freshwater ecotoxicity	kg 1.4-DCB	0,113665	0,112238
Marine ecotoxicity	kg 1.4-DCB	0,146767	0,144201
Human carcinogenic toxicity	kg 1.4-DCB	0,090093	0,084527
Fossil resource scarcity	kg oil eq	0,900296	0,703367

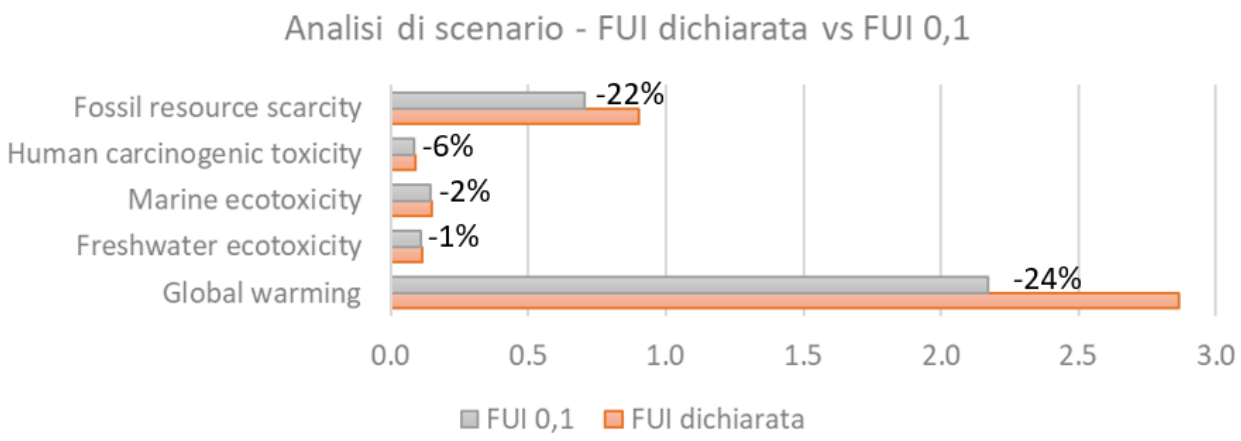


Figura 2.7 Analisi di scenario-Life cycle impact assessment: efficientamento nell'uso di carburante. Le percentuali indicano la diminuzione o l'aumento degli impatti che si avrebbe adottando la strategia alternativa.

Scenario 3: sostituzione delle vaschette in PET con retine in PE per il confezionamento della vongola biologica

Tabella 2.5 Analisi di scenario-Life cycle impact assessment: sostituzione delle vaschette in PET con retine in PE per il confezionamento finale.

Categoria d'impatto	***Unità***	*Packaging PET*	*Packaging PE*
Global warming	kg CO2 eq	2,862499	2,441044
Freshwater ecotoxicity	kg 1.4-DCB	0,113665	0,098852
Marine ecotoxicity	kg 1.4-DCB	0,146767	0,12714
Human carcinogenic toxicity	kg 1.4-DCB	0,090093	0,068532
Fossil resource scarcity	kg oil eq	0,900296	0,709826

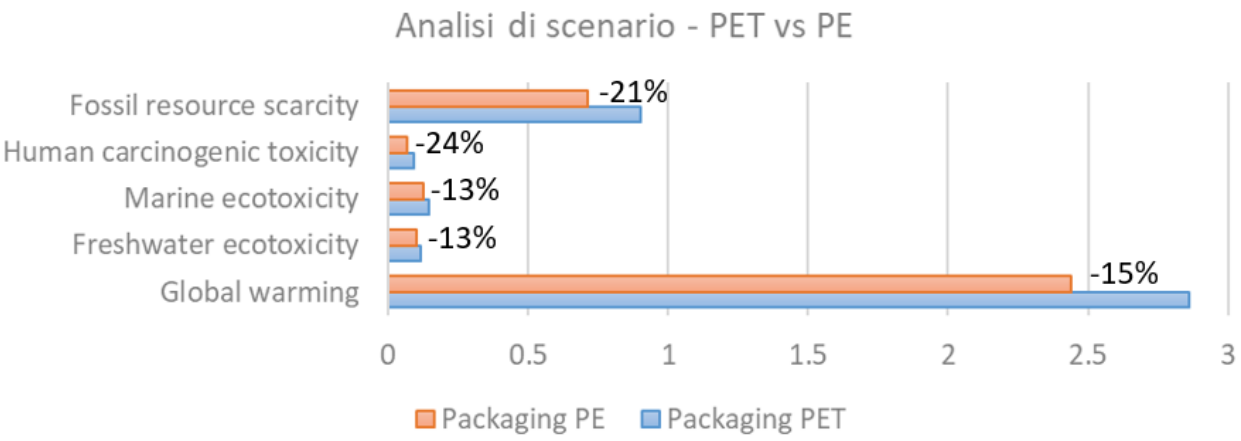


Figura 2.8 Analisi di scenario-Life cycle impact assessment: sostituzione delle vaschette in PET con retine in PE per il confezionamento finale. Le percentuali indicano la diminuzione o l'aumento degli impatti che si avrebbe adottando la strategia alternativa.

Potenziale sequestro di anidride carbonica associato al processo di biocalcificazione/formazione della conchiglia per i casi studio analizzati

I dati ambientali utilizzati per calcolare il potenziale sequestro di anidride carbonica derivante dal processo di biocalcificazione della conchiglia sono stati reperiti attraverso la piattaforma AquaX (ColomboSky), appositamente implementata per quest'area di studio, e sono riportati in Tabella 2.7. In Tabella 2.8 sono riportati i flussi di carbonio biogenico derivanti dai processi di biocalcificazione, il computo del potenziale sequestro di carbonio e il bilancio netto tra il risultato dell'indicatore Global Warming (Carbon Footprint, in kg CO_2 eq/kg prodotto) e il potenziale sequestro di carbonio.

L'integrazione del potenziale sequestro di CO_2 derivante dalla biocalcificazione (=-0,09 kg CO_2 eq/kg prodotto per CS-A e 0,08 kg CO2 eq/kg di prodotto per CS-B e CS-C) al modello LCA permette di ridurre le emissioni di gas climalteranti della filiera della venericoltura condotta nelle Sacche di Scardovari (CS-A) e Goro (CS-B e CS-C) di 9% per CS-A, 11% per CS-B e 3% per CS-C (Tabella 2.8).

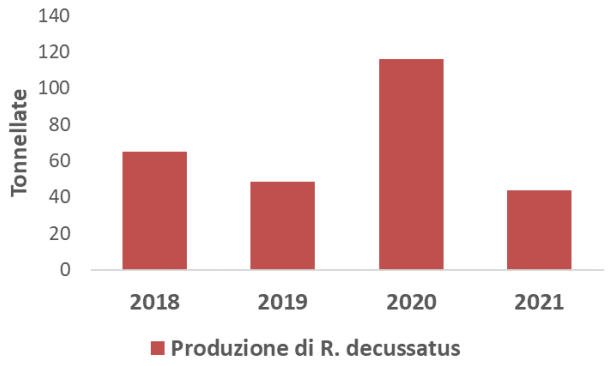
Tabella 2.6 Parametri ambientali utilizzati per il calcolo della CO_2 emessa durante i processi di biocalcificazione, anno di riferimento 2020.

Dati ambientali	Media annuale in Sacca di Scardovari (CS-A)	Media annuale in Sacca di Goro (CS-B, CS-C)
pCO_2	295,17 µatm	292,15 µatm
Temperatura	17,20 °C	18,20 °C
Salinità	32,55 psu	32,75 psu
pH	8,18	8,17
Ψ (parametro derivato)	**0,64**	**0,63**

Tabella 2.7 Calcolo dei flussi di carbonio biogenico (CO_2 sequestrata all'interno della conchiglia e CO_2 emessa dal processo stesso) e computo del potenziale sequestro di carbonio netto ed integrazione di esso all'indicatore Global Warming del modello LCA.

Calcolo dei flussi biogenici di CO_2 relativi alla biocalcificazione	**CS-A**	**CS-B e C**
% di conchiglia rispetto peso totale mollusco	58%	56%
% contenuto in carbonato di calcio della conchiglia	94%	93%
CO_2 sequestrata nella conchiglia dal processo di biocalcificazione (kg/kg prodotto)	-0,24	-0,23
CO_2 rilasciata durante il processo di formazione della conchiglia (kg/kg prodotto)	0,15	0,14
Potenziale sequestro di CO_2 (kg/kg di prodotto)	***-0,09***	***0,08***
Global warming al netto del potenziale sequestro di carbonio derivante dalla biocalcificazione (kg CO_2 eq/kg prodotto)	***0,909***	***0,682 (CS-B)*** ***2,778 (CS-C)***

2.2.5 La vongola verace in Sardegna e l'ostrica giapponese



Le produzioni di vongola verace autoctona (*Ruditapes decussatus*) in Italia hanno subito una drastica riduzione con l'introduzione, negli anni '90, della vongola verace filippina. Il trend degli ultimi anni ha visto produzioni stabili e modeste, limitate alla sola Sardegna, con una produzione di 29,2 t nel 2021.

Sono state identificati le seguenti imprese che producono vongola verace autoctona:

1) Consorzio Ittico Santa Gilla;
2) Sant'andrea Scrl;
3) PESCATORI S. ANDREA SOC. COOP.;
4) Consorzio cooperative riunite della pesca di Marceddì Scrl, con i due impianti di Peschiera Marceddì e San Giovanni Valle di Marceddì Corru S'ittiri;
5) Il Risveglio Scrl.

Date le limitate produzioni, le caratteristiche biologiche della specie (lento accrescimento) e la totale mancanza di filiere per la produzione del seme, la quantificazione degli impatti mediante LCA legata a questa specie non ha prodotto risultati utili e confrontabili con la filiera della vongola verace filippina.

Di conseguenza, si è preferito dedicare un modulo di approfondimento ad una specie dal maggior interesse economico e le cui produzioni sono in aumento in Italia dal 2017: l'ostrica concava giapponese (*Crassostrea gigas*). Si rimanda all'Allegato LCA ostrica per l'illustrazione del caso studio preso in esame ed i risultati dettagliati, ottenuti nell'ambito del progetto formativo "Messa a punto di un modello di Life Cycle Assessment per la filiera dell'ostrica concava (*Crassostrea gigas*) in acquacoltura", svolto durante il tirocinio curriculare attivato in collaborazione con il Politecnico di Torino.

I risultati delle analisi di LCA condotte sulle tre principali specie di molluschi bivalvi allevati in Italia hanno permesso di **confrontare le tre filiere**, con un dettaglio a livello di caso studio, per la categoria di impatto Global Warming e per il potenziale sequestro di carbonio (Tabella 2.9, Figura 2.9).
Emerge che, a parte la filiera della vongola biologica, per la quale sono state precedentemente dettagliate le particolarità e le criticità, l'ostrica ha maggiori impatti nella categoria Global Warming, mentre i mitili allevati in zone di Classe A hanno gli impatti più limitati. Il contributo in termini di sequestro di carbonio è assolutamente comparabile per le tre specie in tutti i sistemi di allevamento.

Tabella 2.9 Risultati di Life cycle Impact Assessment per la sola categoria "Global warming" (i.e., Carbon Footprint) e calcolo del potenziale sequestro di carbonio dovuto al processo di biocalcificazione (al netto della CO_2 rilasciata durante il processo stesso). I risultati sono espressi in kg CO_2 equivalente per kg di molluschi vivi e pronti alla vendita.

	Global warming (kg CO_2 eq/kg molluschi)	**Sequestro di carbonio** (kg CO_2 eq/kg molluschi)
Mitili (classe A)	0,10	-0,08
Mitili (classe B)	0,53	-0,08
Ostriche (classe A)	1,65	-0,08
Ostriche (class B)	1,87	-0,08
Vongole (CS-A)	0,99	-0,09
Vongole (CS-B)	0,84	-0,09
Vongole (CS-C)	2,86	-0,09

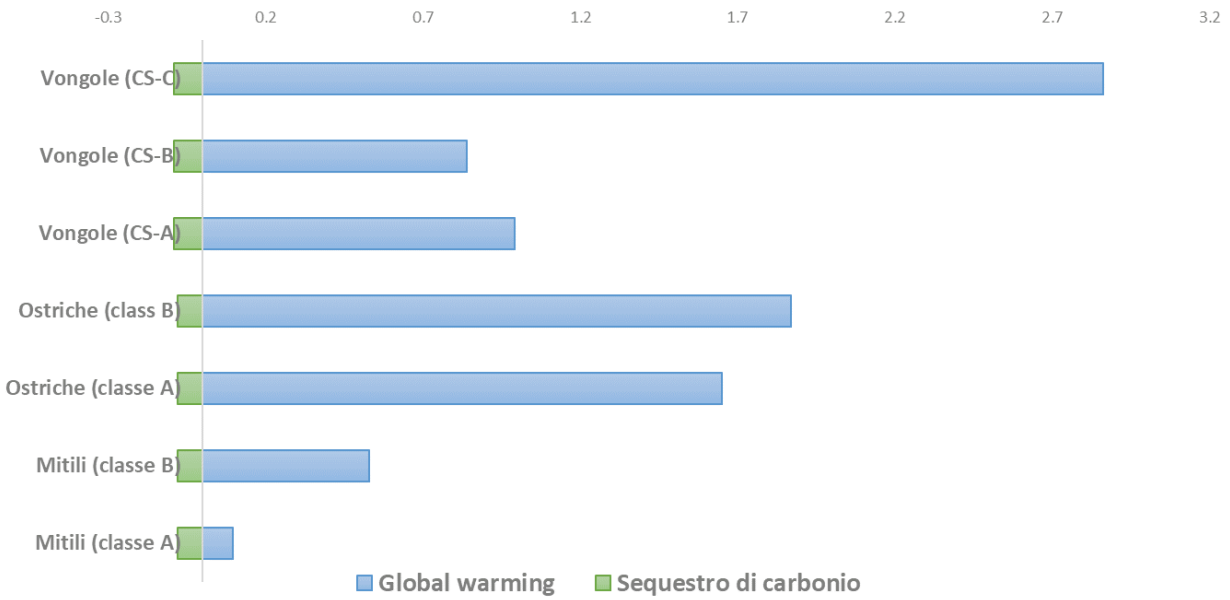
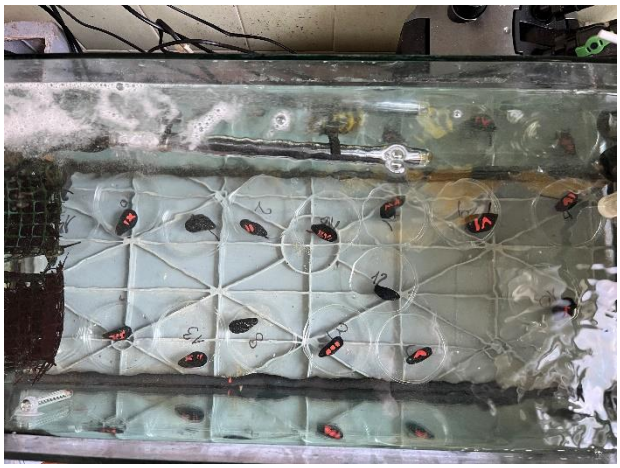


Figura 2.9 Rappresentazione grafica dei risultati di Life Cycle Impact Assessment (Global warming) e del calcolo del potenziale sequestro di carbonio attraverso la biocalcificazione, al netto della CO_2 emessa durante il processo stesso. I risultati sono espressi in kg CO_2 equivalente per kg di molluschi vivi e pronti alla vendita.

2.2.6 Messa a punto di un protocollo per prove di resistenza del bisso di mitilo mediterraneo in diverse condizioni di pH

Tra le ormai note conseguenze dei cambiamenti climatici vi è sicuramente l'acidificazione (abbassamento del pH) dell'acqua di mare, che influenza negativamente il processo di biocalcificazione, fondamentale per molti organismi marini, tra cui i molluschi bivalvi.
Oltre ad influenzare la biocalcificazione, numerosi studi evidenziano come un abbassamento del pH rispetto a quello mantenuto costante dal sistema tampone dell'acqua di mare, interferisca in maniera negativa con la formazione del bisso (Zhao et al., 2017; O'Donnel et al., 2013). Quest'ultimo consiste in un insieme di filamenti elastici prodotti da molte specie di molluschi bivalvi per ancorarsi durante la fase di settlement al substrato, dove conducono poi vita sessile, e in questo modo contrastare le correnti e le mareggiate. Molti allevatori di mitili lamentano una diminuzione dell'attecchimento dei giovanili ai supporti (es., cime dei sistemi di long-line) da cui vengono prelevati per essere inseriti nelle reste di allevamento. Data l'importanza di questa tematica e

l'interesse tra gli operatori del settore, si è deciso di dedicare uno specifico focus alla messa a punto di un protocollo sperimentale per lo studio del fenomeno.
Per indagare l'effetto dell'acidificazione dell'acqua di mare e resistenza e numerosità dei filamenti del bisso è stato messo a punto un protocollo sperimentale nel sistema di acquari sperimentali del CREA. I risultati della sperimentazione costituiranno un interessante follow-up del progetto VALUE-SHELL.
In condizioni controllate (vasche sperimentali, con un adeguato filtraggio biologico e meccanico per ricreare condizioni ideali per i mitili), gli individui di *Mytilus galloprovincialis* saranno esposti a valori decrescenti di pH. Al fine di permettere una regolazione precisa dei valori di pH, nel sistema di acquari è stato istallato un sistema di controllo del pH, con sonda e bombola di CO_2, per permettere una regolazione a feedback in modo da contrastare la tendenza dell'acqua marina alla basicità, mantenendo i valori di pH intorno ad un valore fissato.
Per testare il funzionamento del sistema, sono stati prelevati alcuni individui vivi presso gli allevamenti siti nella Sacca di Scardovari. Gli individui sono stati acclimatati alle nuove condizioni per circa sette giorni.
Terminato il periodo di acclimatazione, ciascun individuo, privato del bisso, è stato posto all'interno di capsule Petri numerate e disposte in modo randomico nell'acquario (Figura 2.10 A).
Il protocollo sperimentale prevede che gli individui siano sottoposti a condizioni di pH costanti, via via decrescenti, per un periodo di circa 20 giorni, sufficiente a garantire la completa formazione del bisso.
Ogni cinque giorni, mediante una foto al microscopio (Figura 2.10 B), vengono registrate le informazioni relative a numero e lunghezza dei filamenti del bisso.



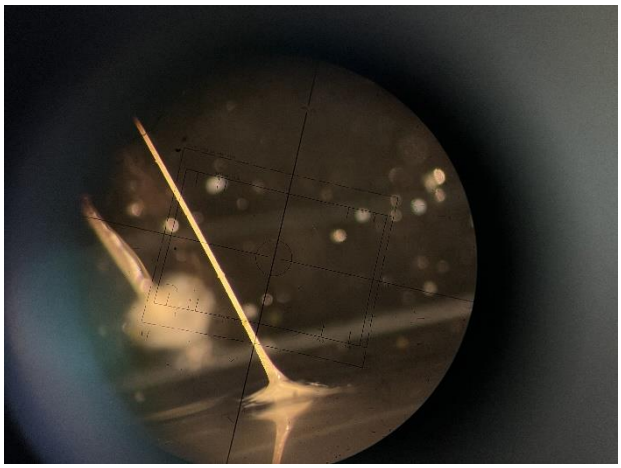


Figura 2.10 (A) Mitili numerati e posti nelle capsule Petri all'interno dell'acquario sperimentale **(B)** Bisso al microscopio

Alla fine del periodo test, vengono recisi, contati e misurati tutti i filamenti, ad eccezione di uno, su cui viene eseguito un test di resistenza alla trazione lungo la verticale attraverso l'utilizzo di un dinamometro ad elevata sensibilità, che permette di misurare la forza necessaria prima all'estensione del filamento e conseguentemente alla sua rottura.
Il disegno sperimentale prevede l'esposizione a diversi valori di pH, fino a 7,5, in accordo con i valori previsti dagli scenari futuri a causa dei cambiamenti climatici.

2.2.7 Messa a punto di strumenti di controllo e modelli previsionali a disposizione degli allevatori

Nell'ambito del progetto VALUE-SHELL è stato stipulato un accordo di collaborazione (ex art. 15 L. 241/90) con l'Istituto Zooprofilattico Sperimentale delle Venezie per lo sviluppo di conoscenze e competenze riguardanti il monitoraggio di parametri ambientali e biologici (sia *in-situ* che da immagini satellitari) per la previsione di fioriture algali tossiche e potenzialmente dannose per la sicurezza alimentare dei mitili allevati in Alto Adriatico.

L'IZSVe ha fornito i dati di presenza e concentrazione di specie algali responsabili del rilascio di biotossine in ambiente marino-costiero e di biotossine nei molluschi, con particolare riferimento all'acido okadaico (AO), derivanti dai controlli di carattere igienico-sanitario svolti nelle zone di produzione dell'area del Polesine per il periodo compreso tra il 2016 e il 2020.

Il CREA-ZA, mediante la collaborazione con la start-up ColomboSky, ha messo a punto un modello previsionale che, sulla base dei dati ambientali monitorati in continuo nell'area di interesse e della serie storica di presenza e concentrazione di biotossine nei molluschi fornita dall'IZSVe, consente di stimare con un buon grado di accuratezza la probabilità di bioaccumulo di biotossine nella specie allevata *Mytilus galloprovincialis* (mitilo Mediterraneo).

Si allega alla presente relazione la relazione tecnica fornita da ColomboSky (Allegato Applicazione di metodi di Machine Learning alla predizione del bioaccumulo di tossine marine nei molluschi in Nord Adriatico) per una spiegazione dettagliata dei metodi utilizzati e dei risultati ottenuti.

In breve, negli ultimi vent'anni, le fioriture di alghe tossiche sono notevolmente aumentate in termini di frequenza, durata e intensità, principalmente a causa dell'eutrofizzazione costiera dovuta all'aumento della popolazione mondiale e del conseguente aumento del tasso di urbanizzazione lungo le coste, dell'intensificazione dell'agricoltura e dell'incremento dell'industrializzazione. Questo fenomeno è destinato ad intensificarsi nei prossimi anni a causa degli effetti combinati dei cambiamenti climatici (Grattan et al., 2016; Kovats et al., 2014; Hallegraeff et al., 2010; Rabalais et al., 2009). I molluschi bivalvi, filtrando grandi quantità di fitoplancton, nel corso degli eventi di fioriture algali tossiche possono divenire pericolosi per il consumo umano (Andersen et al., 1996; Anderson et al., 2012). Le fioriture di Dinoflagellati, in particolare del genere *Dinophysis*, sono endemiche delle coste Mediterranee dell'Europa e sono responsabili della produzione di tossine del gruppo dell'acido okadaico (acido okadaico e dinophysitossine), causa della DSP "*Diarrhetic Shellfish Poisoning*". Le aree di produzione del mitilo mediterraneo lungo le coste italiane del Nord Adriatico sono affette da eventi di DSP dal 1989 (France & Mozetic, 2006; Sedmak & Fanuko, 1991), in particolare nelle aree marine di fronte al Delta del Po (Veneto, Italia) (Pistocchi et al., 2021).

In queste aree, varie specie del genere *Dinophysis* sono state identificate come coinvolte nei fenomeni di DSP e le concentrazioni più elevate di queste alghe tossiche sono state registrate nei periodi da maggio ad ottobre (Poletti et al., 1998; Sidari et al., 1995), con una successione ecologica piuttosto evidente: *D. sacculus* in tarda primavera, con un picco a giugno, seguita da *D. caudata* all'inizio dell'autunno e *D. fortii* in ottobre e novembre (Bernardi Aubry et al., 2000; Della Loggia et al., 1993).

L'impatto delle fioriture di *Dinophysis* aumenterà nel futuro, per effetto stesso dell'espansione della maricoltura. Per proteggere la salute umana dai potenziali rischi di questi fenomeni, l'Unione Europea ha implementato un sistema di monitoraggio obbligatorio con cadenza settimanale nelle aree di produzione di molluschi bivalvi: in caso di concentrazioni di acido okadaico superiori a 160 $\mu g \cdot kg^{-1}$ (Reg. (EC) 627/19 e successive modifiche), le attività di raccolta dei molluschi bivalvi devono essere immediatamente sospese e la zona di produzione deve essere chiusa. Per contenere gli effetti negativi di queste sospensioni per gli allevatori (perdite di prodotto e conseguente perdita economica, con impatti ambientali anch'essi negativi), è di fondamentale importanza mettere a punto dei modelli previsionali a supporto dei sistemi di monitoraggio.

Attualmente sono disponibili modelli che correlano e tentano di predire le fioriture di *Dinophysis* sulla base di alcuni parametri ambientali (es., temperatura, salinità, densità, velocità delle correnti, velocità e direzione del vento, concentrazione di nutrienti) o biologici (disponibilità di prede, ad esempio del genere *Mesodinium*) (Ajani et al., 2016; Harred et al., 2014). Tali modelli spesso non consentono di identificare relazioni univoche forti e significative, a causa della peculiare ecologia delle alghe del genere *Dinophysis*, con particolare riferimento al loro comportamento mixotrofico (Caroppo et al., 2001; Lessard et al., 1991).
Approcci più moderni basati su reti neurali hanno avuto più successo nella previsione dei bloom di *D. acuminata* lungo le coste dell'Andalusia (Spagna) (Velo-Suárez & Gutiérrez-Estrada, 2007).
Lo studio condotto dal CREA ZA, in collaborazione con ColomboSky ed IZSVe, ha avuto l'obiettivo di sviluppare un modello predittivo per il bioaccumulo di acido okadaico nel mitilo mediterraneo allevato nelle aree marino costiere a largo del Delta del Po, basato su dati oceanografici satellitari. La scelta di utilizzare dati di bioaccumulo e non di concentrazioni di cellule algali è dovuta al fatto che non esistono linee guida o studi che definiscano un limite di concentrazione di cellule tale da definire l'insorgenza di un *bloom*, poiché alcune specie possono essere estremamente tossiche anche a basse concentrazioni (< 10 cellule·l^{-1}) (Simoes et al., 2015; Reguera et al., 2012).
I risultati del modello, anche se ancora preliminari, sono stati integrati nella piattaforma AQUAX (ColomboSky) per fornire uno strumento di allerta precoce (*early warning*) all'allevatore circa il rischio di bioaccumulo con una previsione di 48 ore.
Per la messa a punto del modello, dal dataset dell'IZSVe sono state selezionate soltanto le stazioni di campionamento situate in mare aperto (N = 167, Figura 2.11), per garantire adeguata copertura satellitare. Il dataset, così ripulito, è costituito da 1.486 osservazioni, di cui 74 positive ai sensi del Reg. (EC) 627/19 (AO_{eq}> 160 µg·kg^{-1}). Al fine di aumentare il numero di casi positivi, la soglia della concentrazione di acido okadaico è stata abbassata a 40 µg·kg^{-1}, corrispondente al limite di rilevabilità dello strumento (LOQ = *limit of quantification*). I casi sono stati classificati con un sistema binario come "classe 1" (AO_{eq}> 40 µg·kg^{-1}) e "classe 0" (AO_{eq}< 40 µg·kg^{-1}) (Tabella 2.10).

Tabella 2.10. Casi classificati come positivi (classe "1") per ciascuna annualità dal 2016 al 2020.

Anno	N. casi	N. casi "classe 1"	%
2016	312	17	5,4
2017	391	130	33,2
2018	354	8	2,3
2019	306	54	17,6
2020	123	35	28,5

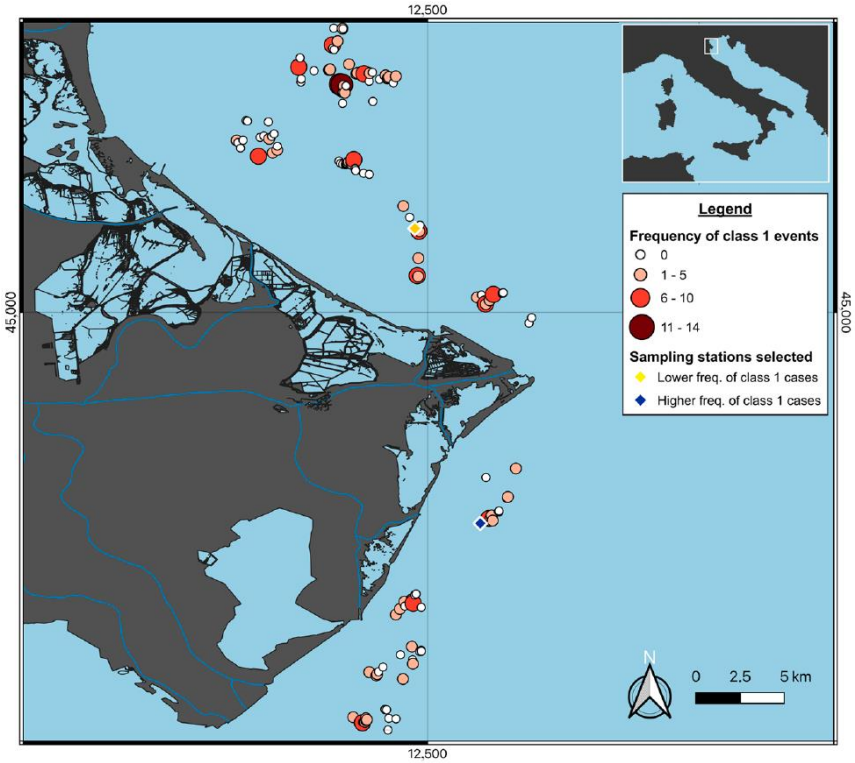


Figura 2.11. Stazioni di campionamento in mare aperto nell'area marina di fronte al Delta del Po, mostrate con colori e dimensioni diverse a seconda della frequenza di casi di classe "1" che si sono verificati dal 2016 al 2020. In giallo e in blu sono evidenziate due stazioni di campionamento prese come esempio di bassa (= 0) e alta frequenza di eventi di tossicità, rispettivamente, per l'analisi dei parametri ambientali.

I dati sono stati suddivisi in: 1) dataset di *training* (1.057 campioni, antecedenti al 2019, di cui 155 in "classe 1"); 2) dataset di *testing* (429 campioni, successivi al 2019, di cui 89 in "classe 1"). A ciascun campionamento sono stati associati nel dataset i valori di 15 parametri fisico-chimici delle 6 settimane (45 gg) antecedenti il campionamento stesso. I parametri sono stati selezionati sulla base della loro possibile correlazione causale con le fioriture di *Dinophysis*:

- Concentrazione di clorofilla ([Chl], mg m^{-3});
- Contributo delle Dinophyceae alla concentrazione totale di clorofilla (calcolato come da Di Cicco et al., 2017);
- Velocità del vento, suddivisa in componente Nord ed Est (m s^{-1});
- Spessore dello strato di rimescolamento della colonna d'acqua (m);
- Concentrazione di NH_4 ([NH_4], mmol m^{-3});
- Concentrazione di NO_3 ([NO_3], mmol m^{-3});
- Concentrazione di PO_4 ([PO_4], mmol m^{-3});
- Concentrazione di O_2 disciolto ([O_2], mmol m^{-3});
- Rapporto nitrati/fosfati;
- Precipitazioni giornaliere (mm g^{-1});
- Salinità (psu);
- Temperatura superficiale dell'acqua (°C);
- Componenti Nord e Sud delle correnti marine (m s^{-1});
- Pressione parziale del vento sulla superficie del mare (Pa);
- Radiazione solare (Wh m^{-2}).

I dati dei parametri menzionati sono stati estratti dalle serie storiche disponibili dei dati satellitari e sono stati combinati con un modello oceanografico appositamente elaborato da ColomboSky per l'area di interesse in modo da ottenere una risoluzione maggiore. I dati relativi a precipitazioni

giornaliere e radiazione solare sono stati ottenuti dal modello atmosferico di *Copernicus* (https://atmosphere.copernicus.eu). Per ciascun parametro, sono stati calcolati i seguenti indici statistici settimanali, poi utilizzati nel modello per ridurre le dimensioni del dataset e semplificare il modello stesso: media, minimo, massimo, varianza, skewness e kurtosi.
Poiché il dataset è estremamente sbilanciato a favore della classe "0", la categoria dei casi positivi è stata campionata più di frequente utilizzando la tecnica del "Synthetic Minority Oversampling Technique" (SMOTE) (Chawla et al., 2022). Sono stati elaborati diversi algoritmi di machine learning attraverso una procedura di "model selection", utilizzando il Coefficiente di Mathews come metrica di ottimizzazione. Attraverso questa procedura, è stato selezionato l'algoritmo LightGBM (Ke et al., 2017).
Dall'osservazione del dataset sul bioaccumulo di acido okadaico nei mitili è emerso come il 2017 sia stato l'anno in cui si è verificato il numero maggiore di eventi (130), ripartiti nelle stagioni estiva (44) ed autunnale (86). Gli anni con il minor numero di eventi sono stati il 2018 (8, tutti in autunno e mai al di sopra della soglia di 160 $\mu g \cdot kg^{-1}$ definita dal Regolamento) e 2016 (17, tutti in autunno e mai al di sopra della soglia di 160 $\mu g \cdot kg^{-1}$ definita dal Regolamento). A partire dal 2019, sono stati osservati anche casi invernali (1 unico caso nel 2019, 5 nel 2020) e primaverili (9 casi nel 2020) (Figura 2.12). Nel 2019 si sono verificati gli eventi più gravi in termini di concentrazioni di acido okadaico.

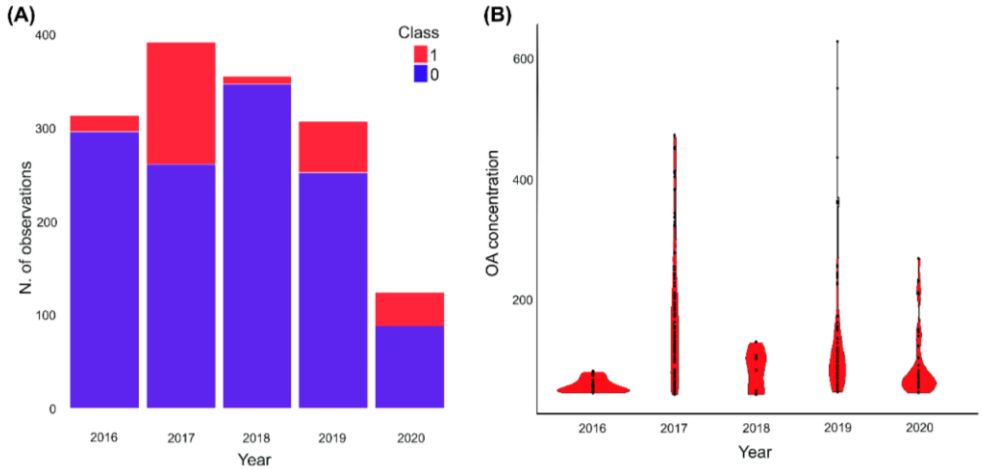


Figura 2.12 (A) Numero di eventi di "classe 1" e "classe 0" per ciascun anno **(B)** Violin-plot delle concentrazioni di acido okadaico ($\mu g \cdot kg^{-1}$) nei mitili per ciascun anno.

Per interpretare i risultati dell'algoritmo di classificazione è stata utilizzata una matrice di confusione, un efficace strumento per leggere i risultati di un algoritmo di classificazione binaria. Essa riporta sinteticamente i Veri Positivi (VP, dati correttamente classificati nella classe positiva), i Falsi Positivi (FP, dati di classe negativa, classificati come positivi), i Veri Negativi (VN, dati correttamente classificati nella classe negativa) e i Falsi Negativi (FN, dati di classe positiva classificati come negativi). In generale, un algoritmo sarà tanto più performante tanto più il numero di falsi positivi e falsi negativi sarà ridotto.
Nella Figura 2.13 si riporta la matrice di confusione ottenuta mediante l'algoritmo di classificazione utilizzato.

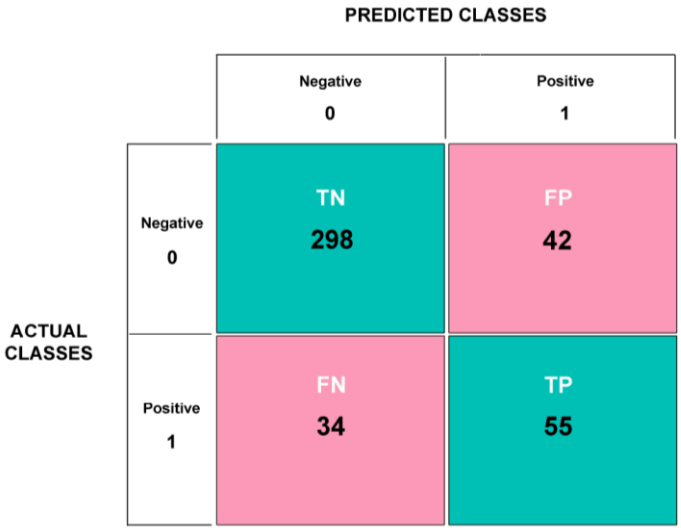


Figura 2.13 Matrice di confusione ottenuta applicando al dataset di testing l'algoritmo LightGBM.

A seconda del caso di riferimento, il numero di falsi positivi e falsi negativi può essere regolato (aumentare uno, diminuire l'altro) secondo la curva ROC (*receiver operating characteristic curve*) associata all'algoritmo. I risultati presentati in questa analisi sono stati estratti bilanciando i numeri di falsi positivi e falsi negativi senza dare priorità ad uno dei due valori.
Attraverso una semplice formula, è stato possibile calcolare l'accuratezza (A) del modello previsionale:

$$A = (VP + VN)/(VP + VN + FP + FN) = \mathbf{82\%}$$

Da un'analisi dettagliata dei falsi negativi, è possibile notare come tendenzialmente questi siano associati a bassi valori di concentrazione di biotossine (< 100 $\mu g \cdot kg^{-1}$), mentre i veri positivi presentano in media valori di concentrazione più elevati, indice del fatto che l'algoritmo tende, in alcuni casi, a classificare basse concentrazioni di biotossine come campioni negativi.
In assenza dei valori esatti di tutti i campioni positivi (dal dataset a disposizione non è possibile distinguere le concentrazioni esattamente pari a 0 e quelle < 40 $\mu g \cdot kg^{-1}$, per via dei limiti strumentali) non è possibile condurre un'analisi analoga per i falsi positivi e veri negativi.
Tuttavia, è interessante notare l'andamento temporale dei falsi positivi, i quali sono concentrati principalmente nel mese di agosto.
Grazie all'algoritmo di classificazione utilizzato, è stato possibile ricavare alcune indicazioni sui parametri che maggiormente hanno contribuito al risultato, attraverso l'indicazione di importanza statistica nel predire il bioaccumulo di tossine (Figura 2.14). L'importanza dei parametri, attraverso le tecniche di "Information Gain", è stata calcolata attribuendo un punteggio a tutte le *features* di input, che rappresentano semplicemente l'importanza di ciascuna *feature*. Un punteggio più alto indica che la feature considerata ha un effetto maggiore sul modello utilizzato per prevedere l'output. Sono state identificate le 10 features più importanti nel processo di discriminazione tra elementi positivi e negativi, in ordine decrescente di importanza:

1. Valore minimo della pressione superficiale del vento (*wind stress*) alla settimana 3;
2. Valore minimo dell'ossigeno disciolto (O_2) alla settimana 6;
3. Valore minimo della componente Est (*East wind*) della direzione del vento alla settimana 3;
4. Varianza della temperatura superficiale del mare (*surface temperature*) alla settimana 3;
5. Valore minimo del rapporto tra nitrati e fosfati (NO_3/PO_4) alla settimana 4;
6. Valore massimo di concentrazione di clorofilla (Chl) alla settimana 4;

7. Valore massimo di concentrazione di clorofilla (Chl) alla settimana 3;
8. Valore minimo del rapporto tra nitrati e fosfati (NO_3/PO_4) alla settimana 3;
9. Valore di kurtosi della temperatura superficiale del mare (*surface temperature*) alla settimana 3;
10. Valore minimo del rapporto tra nitrati e fosfati (NO_3/PO_4) alla settimana 6.

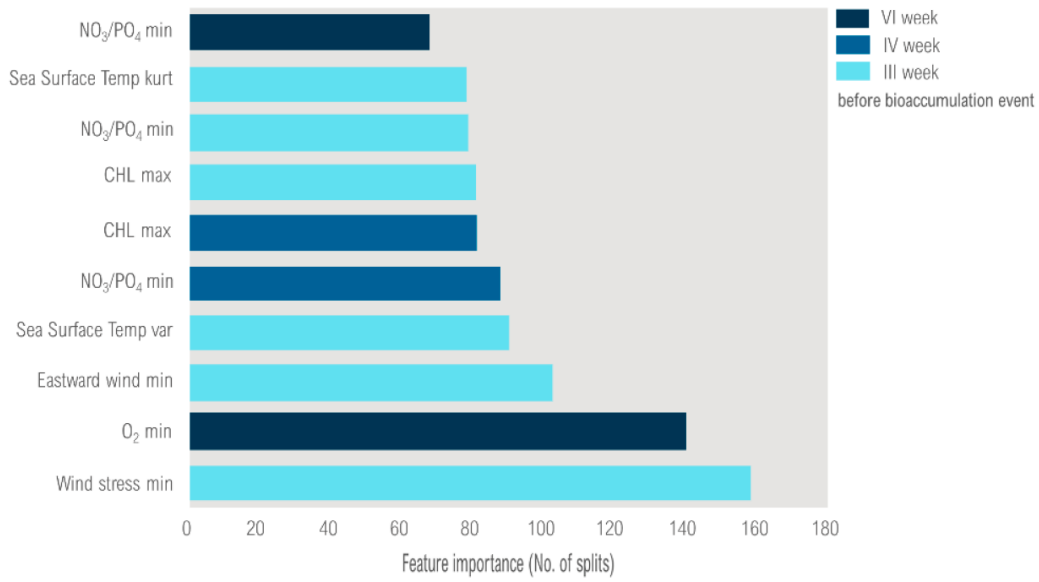


Figura 2.14 Features che maggiormente hanno contribuito al risultato, attraverso l'indicazione di importanza statistica nel predire l'evento di tossicità.

Attualmente, è in corso la validazione "off line" del modello attraverso il confronto con i campionamenti reali resi disponibili dall'IZSVe. AL termine di questo processo di validazione, il modello sarà reso disponibile agli allevatori per valutarne il grado di interesse e possibili applicazioni future.

2.2.8 Prodotti della ricerca (disponibili nella cartella Allegati)

1. Pulcini, D., Casarotto, C., Fumelli, P., Martinoli, M., Moranduzzo, T., Rossetti, E. (2023). Accumulo di acido okadaico nei mitili allevati. Quali i potenziali vantaggi di un modello predittivo per il rischio di bioaccumulo? SIRAM, Cagliari 13-14 ottobre 2023. Presentazione orale.
2. Capoccioni, F., Bille, L., Colombo, F., Contiero, L., Martini, A., Mattia, C., ... & Pulcini, D. (2023). A Predictive Model for the Bioaccumulation of Okadaic Acid in Mytilus galloprovincialis Farmed in the Northern Adriatic Sea: A Tool to Reduce Product Losses and Improve Mussel Farming Sustainability. Sustainability, 15(11), 8608.
3. Martini, A., Aguiari, L., Capoccioni, F., Martinoli, M., Napolitano, R., Pirlo, G., Tonachella, N., Pulcini, D. (2023). Is Manila Clam Farming Environmentally Sustainable? A Life Cycle Assessment (LCA) Approach Applied to an Italian Ruditapes philippinarum Hatchery. Sustainability, 15, 3237. https://doi.org/10.3390/su15043237
4. Martini, A., Napolitano R., Capoccioni, F., Martinoli, M., Tonachella, N., Pulcini, D. (2023). Mollusk farming and its environmental performance as a potential driver of Blue Growth. SOFAS 2023 (24-26 Ottobre 2023, Trebisonda, Turchia). Presentazione orale
5. Martini, A. (2023). Critical issues in two examples of bivalve mollusc supply chains and possible mitigation actions. AQUAFARM 2023 trade fair (15 - 16 February 2023, Pordenone, Italy) - workshop "Iniziative pilota per una molluschicoltura Carbon Free". Presentazione orale

6. Martini, A., Aguiari, L., Capoccioni, F., Martinoli, M., Napolitano, R., Pirlo, P., Tonachella, N., Pulcini, D. (2023). Environmental impacts of an Italian clam hatchery. AQUAFARM 2023 trade fair (15 - 16 February 2023, Pordenone, Italy). Presentazione poster.
7. Napolitano, R., Capoccioni, F., Martini, A., Martinoli, M., Tonachella, N., Pulcini, D. (2023). Ecosystem services provided by off-shore oyster farming: an Italian case study. AQUAFARM 2023 trade fair (15 - 16 February 2023, Pordenone, Italy). Presentazione poster.
8. Martini, A. (2022). LCA and shellfish farming – a case study of organic Manila clam aquaculture. Workshop - Life Cycle Assessment in Aquaculture, Milan, 5th December 2022. Presentazione orale
9. Martini, A. (2022). Life Cycle Assessment della filiera della vongola verace (Ruditapes philippinarum) biologica. SIRAM 2022, 11th November 2022. Trieste, Italy. Presentazione Poster
10. Martini, A. (2022). Carbon footprint for shellfish. INDUSTRY FORUM. Aquaculture Europe 2022. September 27 - 30, 2022 - Rimini, Italy. Presentazione orale
11. Martini, A. (2022). The importance of a common methodological approach for the assessment of the carbon sink potential of mollusc farming. Aquaculture Europe 2022. September 27 - 30, 2022 - Rimini, Italy. Presentazione orale
12. Martini, A. (2022). Environmental performance of an Italian clam hatchery – a life cycle assessment approach. Aquaculture Europe 2022. September 27 - 30, 2022 - Rimini, Italy. Presentazione poster.
13. Pulcini D., Bille L., Capoccioni F., Colombo F., Martini A., Martinoli M., Mattia C., Moranduzzo T., Tonachella N., Toson M. 2022. A predictive model for accumulation of okadaic acid in Mytilus galloprovincialis during Dinophysis spp. blooms in the Northern Adriatic Sea. POSTER. AquaFarm 2022, Pordenone.
14. Pulcini D., Bille L., Capoccioni F., Colombo F., Contiero L., Dalla Pozza M., Martini A., Martinoli M., Mattia C., Moranduzzo T., Rossetti E., Tonachella N., Toson M. 2022. A predictive model for the accumulation of okadaic acid in Mytilus galloprovincialis in the Northern Adriatic Sea. Aquaculture Europe 2022, September 27-30, Rimini (Italy). POSTER.
15. Martini A., 2022. Ecosystem services of shellfish farming: when potential carbon sequestration is possible. PRESENTAZIONE ORALE. AquaFarm 2022, Pordenone, Workshop "La ricerca del Centro di Zootecnia e Acquacoltura (CREA): innovazione, trasferimento tecnologico e supporto all'Amministrazione".
16. Martini A., 2022. Shellfish farming and carbon sink: the importance of the methodological approach. AquaFarm 2022, Pordenone, Workshop "Progetto Smart Bay Santa Teresa (La Spezia) – La contabilità del Blue Carbon Sink".

2.2.9 Armonizzazione dei risultati con il programma FEAMP 2014-2020

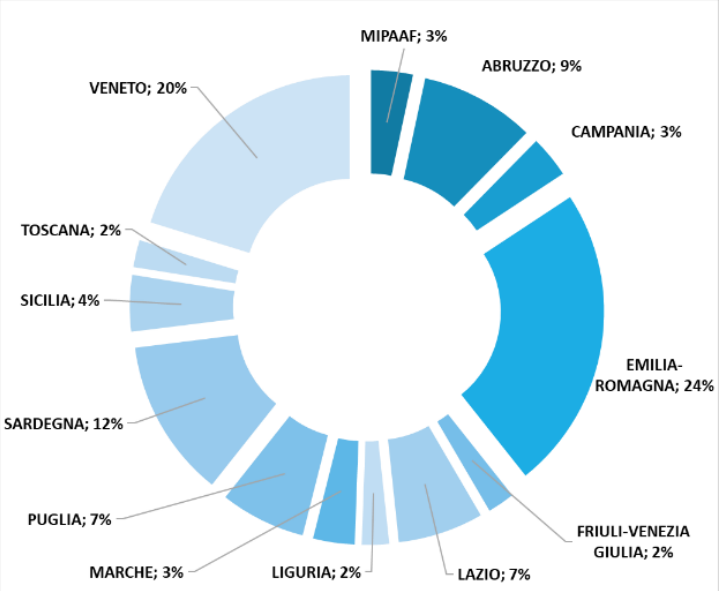
Questa attività è stata svolta in stretta collaborazione con il MIPAAF attraverso la selezione di una figura che, data l'esperienza professionale nella gestione di database e in particolare la conoscenza dei Fondi FEAMP, con l'obiettivo di armonizzare i risultati della sperimentazione prevista nel presente modulo con le attività progettuali in tema di innovazione tecnologica nel settore della molluschicoltura, finanziati alle aziende di nell'ambito del Programma Operativo 2014-2020.
Nelle elaborazioni preliminari mostrate di seguito viene riportato lo stato dell'arte circa i progetti avviati fino a ottobre 2023 (fonte dati: opencoesione.it). In queste elaborazioni non sono stati inclusi i progetti relativi all'azione strategica 3.1 "Investimenti per migliorare la competitività e la redditività delle imprese acquicole" connessi alla misura FEAMP 2.48.

Tabella 2.11 Numero progetti e dotazione finanziaria sul tema "molluschicoltura" finanziati fino ad oggi (agg. giugno 2022) nell'ambito di Fondi FEAMP regionali e nazionali.

MACRO OBIETTIVI DEL PIANO STRATEGICO ACQUACOLTURA 2014-2020	NUMERO PROGETTI	FINANZIAMENTO PUBBICO
2.2 Migliorare l'uso degli spazi marini - Elaborazione di piani regionali per le Zone Allocate per l'Acquacoltura	5	314.838 €
3.4 Misure di sostegno per ragioni di ordine sanitario	2	3.298.834 €
3.5 Sostenere l'innovazione e la ricerca a supporto delle esigenze delle imprese	16	2.405.143 €
3.6 Migliorare la conoscenza e il trasferimento dei risultati	1	318.989 €
3.7 Formazione professionale e apprendimento permanente	4	281.510 €
3.8 Sviluppo di nuovi sistemi acquicoli ad elevata compatibilità ambientale	10	2.448.684 €
3.9 Promozione di metodi di produzione sostenibile	4	2.597.881 €
3.10 Prestazione di servizi ambientali da parte dell'acquacoltura	1	300.000 €
3.14 Buone pratiche in materia di biosicurezza, salute e benessere degli animali in acquacoltura	1	600.000 €
4.2 Etichettatura e tracciabilità e sicurezza alimentare dei prodotti	23	4.747.179 €
4.3 Azioni per la certificazione e la qualificazione del prodotto	6	884.058 €
4.4 Sostegno a piani di mercato e nuovi mercati	6	343.263 €
4.6 Campagne di promozione e comunicazione sull'acquacoltura	1	55.000 €
4.7 Sostegno allo sviluppo e all'attuazione di strategie locali di tipo partecipativo	1	30.500 €
Totale complessivo	**89**	**15.655.035 €**

(fonte: opencoesione)

Figura 2.15 Ripartizione regionale dei progetti.



2.3 Bibliografia

Ajani, P.; Larsson, M.E.; Rubio, A.; Bush, S.; Brett, S.; Farrell, H. Modelling bloom formation of the toxic dinoflagellates Dinophysis acuminata and Dinophysis caudata in a highly modified estuary, southeastern Australia. Estuar. Coast. Shelf Sci., 2016, 183, 95e106.

Andersen, P. Design and Implementation of Some Harmful Algal Monitoring Systems; IOC Technical Series; UNESCO: Paris, France, 1996; Volume 44.

Anderson, D.; Cembella, A.; Hallegraeff, G. Progress in understanding harmful algal blooms: Paradigm shifts and new technologies for research, monitoring, and management. Annu. Rev. Mar. Sci. 2012, 4, 143–176. doi: 10.1146/annurev-marine-120308-081121

Bernardi Aubry, F.; Berton, A.; Bastianini, M.; Bertaggia, R.; Baroni, A.; Socal, G. Seasonal dynamics of Dinophysis in coastal waters of the NW Adriatic Sea. Botanica Marina, 2000, 43, 423–430.

Caroppo, C. Autoecology and morphological variability of Dinophysis sacculus (Dinophyceae: Dinophysiaceae) in a Mediterranean lagoon. J. Mar. Biolog. Assoc. U.K., 2001, 81, 11–21.

Chawla, N.V.; Bowyer, K.W.; Hall, L.O.; Kegelmeyer, W.P. SMOTE: Synthetic Minority Over-sampling Technique. JAIR, 2002, 16, 321–357.

Della Loggia, R.; Cabrini, M.; Del Negro, P.; Honsell, G.; Tubaro, A. Relationship between Dinophysis spp. in seawater and DSP toxin in mussels in the Northern Adriatic Sea. In Smayda, T.J.; Shimizu, Y. (Eds.), Toxic Phytoplankton Blooms in the Sea, Elsevier, Amsterdam, 1993; pp. 483–488.

Di Cicco, A.; Sammartino, M.; Marullo, S.; Santoleri, R. Regional Empirical Algorithms for an Improved Identification of Phytoplankton Functional Types and Size Classes in the Mediterranean Sea Using Satellite Data. Front. Mar. Sci., 2017, 4, 126.

France, J.; Mozetic, P. Ecological characterization of toxic phytoplankton species (Dinophysis spp., Dinophyceae) in Slovenian mariculture areas (Gulf of Trieste, Adriatic Sea) and the implications for monitoring. Mar. Pollut. Bull., 2006, 52, 1504-1516.

Grattan L.M.; Holobaugh, S.; Morris, J.G. Harmful algal blooms and public health. Harmful Algae 2016 57, 2-8.

Hallegraeff, G.M. Ocean climate change, phytoplankton community responses, and harmful algal blooms: A formidable predictive challenge. J. Phycol. 2010, 46, 220-235.

Harred, L.B.; Campbell, L. Predicting harmful algal blooms: a case study with Dinophysis ovum in the Gulf of Mexico J. Plankton Res., 2014, 36(6), 1434–1445.

Ke, G.; Meng, Q.; Finley, T.; Wang, T.; Chen, W.; Ma, W.; Ye, Q.; Liu, T.-Y. LightGBM: A highly efficient gradient boosting decision tree. Adv. Neural Inf. Process. Syst., 2017, 30, 3146–3154.

Kovats, R.S.; Valentini, R.; Bouwer, L.M.; Georgopoulou, E.; Jacob, D.; Martin, E.; Rounsevell, M.; Soussana, J.-F. Europe. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of IPCC. In Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects; Cambridge University Press: Cambridge, UK; New York, NY, USA, 2014; pp. 1267–1326. ISBN 978-1-107-05816-3.

Lessard, E.J. The trophic role of heterotrophic dinoflagellates in diverse marine environments. Mar. Microb. Food Webs, 1991, 5, 49–58.

O'Donnell, M.J., George M.N., Carrington, E. (2013). Mussel byssus attachment weakened by ocean acidification Nature Climate Change 3: 587–590.

Pistocchi, R.; Guerrini, F.; Pezzolesi, L.; Riccardi, M.; Vanucci, S.; Ciminiello, P.; Dell'Aversano, C.; Forino, M.; Fattorusso, E.; Tartaglione, L.; Milandri, A.; Pompei, M.; Cangini, M.; Pigozzi, S.; Riccardi, E. Toxin Levels and Profiles in Microalgae from the North-Western Adriatic Sea—15 Years of Studies on Cultured Species. Mar. Drugs, 2021, 10(1), 140-162. https://doi.org/10.3390/md10010140.

Poletti, R.; Cettul, K.; Bovo, F.; Milandri, A.; Pompei, M.; Frate, R. Distribution of toxic dinoflagellates and their impact on shellfish along Northwest Adriatic Coast. In Reguera, B.; Blanco, J.; Fernandez, M.; Wyatt, T. (Eds.), Harmful Algae. Xunta de Galicia and IOC UNESCO, Santiago de Compostela, 1998; pp. 88–90.

Rabalais, N.N.; Turner, R.E.; Diaz, R.J.; Justic, D. Global change and eutrophication of coastal waters. ICES J. Mar. Sci. 2009, 66, 1528–1537.

Reguera, B.; Velo-Suárez, L.; Raine, R.; Park, M.G. Harmful Dinophysis species: a review. Harmful Algae, 2012, 14, 87e106.

Sedmak, B.; Fanuko, N. Occurrence of Dinophysis spp. and toxic shellfish in the Northern Adriatic. J. Appl. Phycol., 1991, 3, 289–294.

Sidari, L.; Cok, S.; Cabrini, M.; Tubaro, A.; Honsell, G. Temporal distribution of toxic phytoplankton in the gulf of Trieste (Northern Adriatic Sea) in 1991 and 1992. In Lassus, P.; Arzul, G.; Erard-Le Denn, E.; Gentien, P.; Marcaillou-Le Baut, C.; (Eds.), Harmful Marine Algal Blooms, Lavoisier, Paris, 1995; pp. 231–236.

Simoes, E.; Vieira, R.C.; Schramm, M.A.; Mello, D.F.; Pontinha, V.D.A.; Da Silva, P.M.; Barracco, M.A. Impact of harmful algal blooms (Dinophysis acuminata) on the immune system of oysters and mussels from Santa Catarina. Braz. J. Mar. Biol. Ass., 2015, 95, 773e781.

Velo-Suárez, L.; Gutiérrez-Estrada, J.C. Artificial neural network approaches to one-step weekly prediction of Dinophysis acuminata blooms in Huelva (Western Andalucía, Spain). Harmful Algae, 2007, 6, 361–371.

Zhao, X., Guo, C., Han, Y., Che, Z., Wang, Y., Wang, X., Chai, X., Wu, H., Liu, G. (2017). Ocean acidification decreases mussel byssal attachment strength and induces molecular byssal responses. MEPS, 565: 67-77. DOI: https://doi.org/10.3354/meps11992

Monterotondo, 15 ottobre 2023

Il Responsabile di Scheda
Dott.ssa Domitilla Pulcini