

Progetto - Projet

GEREMIA - Gestione dei reflui per il miglioramento delle acque portuali



PRODOTTO T2.1.2 : DEFINIZIONE DI INDICI INTEGRATI SPECIFICI PER I PORTI COINVOLTI NEL PROGETTO

LIVRABLE T2.1.2 : DEFINITION DES INDICES INTEGRES POUR LES PORTS IMPLIQUES DANS LE PROJET

Partner responsabile - Partner responsable : Istituto Superiore per la Protezione e Ricerca Ambientale - Dipartimento di Scienze della Vita e dell'Ambiente (DiSVA) dell'Università Politecnica delle Marche

Nome del prodotto	Redatto da:	Verificato da:	Validato da:
T2.1.2 – Definizione di indici integrati specifici per i porti coinvolti nel progetto	Giuseppe d'Errico, Stefania Gorbi, Francesco Regoli (DiSVA)	Maria Elena Piccione, Sara Dastoli (ISPRA), Laura Cutroneo (UNIGE)	Giovanni Besio, Marco Capello (UNIGE)

Descrizione del Prodotto: Sono stati definiti indici basati sull'integrazione pesata e combinata di un numero minimo di linee di evidenza tale da conservare lo stesso livello di robustezza del modello completo (con tutte e sette le linee di evidenza).

Description du livrable: Les indices ont été définis sur la base de l'intégration pondérée et combinée d'un nombre minimum de lignes de preuve de manière à maintenir le même niveau de robustesse que dans le modèle complet (avec les sept lignes de preuve).

Sintesi

Lo scopo complessivo dello studio è stato quello di effettuare una valutazione approfondita delle condizioni ambientali nelle aree portuali di Olbia, Genova, La Spezia e Tolone. L'aspetto fondamentale di questo prodotto è stato l'elaborazione dei risultati mediante l'applicazione di criteri di valutazione ponderata e la loro integrazione secondo l'approccio Weight of Evidence (WOE). Per questo studio infatti abbiamo parzialmente rielaborato e applicato il modello WOE SediquaSoft che, integra differenti tipologie di dati (o Linee di Evidenza, LOE), tra cui la caratterizzazione chimica dei sedimenti e della colonna d'acqua, la misura del bioaccumulo in organismi bioindicatori, le risposte dei biomarker, l'applicazione di saggi ecotossicologici e la valutazione delle comunità bentoniche. I risultati di ciascuna LOE vengono inizialmente analizzati all'interno di specifici moduli, che utilizzano flowchart e algoritmi matematici appropriati per elaborare ampi data-sets di dati applicando criteri ponderati. Al termine di questa fase vengono forniti indici di pericolo specifici per ciascuna LOE, che sono poi

integrati, dando loro un peso diverso in funzione della rilevanza ecologica di ciascuna tipologia di indagine, per l'elaborazione finale di un indice di rischio complessivo.

Tale lavoro è stato effettuato per tutte le campagne in modo da riuscire a valutare ed evidenziare l'andamento delle condizioni di pericolosità ambientale nel tempo.

Per quanto riguarda la prima campagna, tutti i siti di indagine dei vari porti hanno evidenziato una condizione di rischio ecologico Assente o Basso.

Nella seconda campagna, le condizioni ambientali dei porti mostrano generalmente un passaggio di classe:

- il porto di Olbia passa da una condizione di assenza di rischio ad una classe di rischio Basso (dovuto sia ad un numero maggiore di LOEs investigate sia ad un aumento del livello di pericolo ecotossicologico (LOE5) nella II campagna).
- il porto di Genova da una classe di rischio Basso ad una classe di rischio Medio (dovuto generalmente ad aumento del livello di pericolo della LOE 3 (Biodisponibilità), LOE 4 (Biomarker) e LOE 5);
- il porto di La Spezia mostra una situazione simile rispetto alla campagna precedente con una classe di rischio Basso, ad eccezione del sito "Molo Fornelli" che evidenzia una classe di rischio Medio (dovuto principalmente ad un aumento del livello di pericolo chimico dei sedimenti (LOE 1) e anche alla LOE5;
- il porto di Tolone passa da una condizione ambientale con un rischio Assente/Basso a Basso/Medio (dovuto principalmente ad un aumento della LOE 1.

Sinthese

L'objectif général de l'étude était de réaliser une évaluation approfondie des conditions environnementales dans les zones portuaires d'Olbia, Gênes, La Spezia et Toulon. L'aspect clé de ce produit a été l'élaboration des résultats par l'application de critères d'évaluation pondérés et leur intégration selon l'approche Weight of Evidence (WOE). Pour cette étude, nous avons partiellement révisé et appliqué le modèle WOE de SediquaSoft, qui intègre différents types de données (ou Lines of Evidence, LOE), notamment la caractérisation chimique des sédiments et de la colonne d'eau, la mesure de la bioaccumulation dans les organismes bioindicateurs, les réponses des biomarqueurs, l'application de tests écotoxicologiques et l'évaluation des communautés benthiques. Les résultats de chaque LOE sont initialement analysés dans des modules spécifiques, qui utilisent des organigrammes et des algorithmes mathématiques appropriés pour traiter de grands ensembles de données en appliquant des critères pondérés. À la fin de cette phase, des indices de risque spécifiques sont fournis pour chaque LOE, qui sont ensuite intégrés, en leur donnant un poids différent selon la pertinence écologique de chaque type d'enquête, pour l'élaboration finale d'un indice de risque global.

Ce travail a été effectué pour toutes les campagnes afin de pouvoir évaluer et mettre en évidence la tendance des conditions de danger environnemental dans le temps.

Lors de la première campagne, tous les sites étudiés dans les différents ports présentaient une condition de risque écologique absente ou faible.

Lors de la deuxième campagne, les conditions environnementales des ports montrent généralement un changement de classe :

- le port d'Olbia passe d'une condition de risque Absent à une classe de risque Faible (en raison à la fois d'un nombre plus élevé de LOEs étudiés et d'une

augmentation du niveau de danger écotoxicologique (LOE5) dans la campagne II).

- le port de Gênes d'une classe de risque faible à une classe de risque moyen (généralement en raison d'une augmentation du niveau de danger de LOE 3 (biodisponibilité), LOE 4 (biomarqueur) et LOE 5) ;
- le port de La Spezia présente une situation similaire par rapport à la campagne précédente avec une classe de risque faible, à l'exception du site "Molo Fornelli" qui présente une classe de risque moyen (principalement en raison d'une augmentation du niveau de danger chimique des sédiments (LOE 1) et également LOE5 ;
- le port de Toulon passe d'une condition environnementale avec un risque Absent/Faible à un risque Faible/Moyen (principalement dû à une augmentation de la LOE 1.

Indice

1 - Introduzione.....	1
2 – Applicazione dei criteri di integrazione ponderata per l’elaborazione dei dati chimici e biologici.....	3
2.1 Criteri di integrazione ponderata per l’elaborazione dei dati chimici dei sedimenti	4
2.2 Criteri di integrazione ponderata per l’elaborazione dei dati chimici della colonna d’acqua	5
2.3 Criteri di integrazione ponderata per l’elaborazione dei dati di biodisponibilità ..	7
2.4 Criteri di integrazione ponderata per l’elaborazione dei dati dei biomarker	8
2.5 Criteri di integrazione ponderata per l’elaborazione dei dati ecotossicologici	9
2.6 Criteri di integrazione ponderata per l’elaborazione dei dati delle comunità bentoniche	10
2.7 Elaborazione finale Weight of Evidence WOE e definizione dell’indice integrato per gli ambienti portuali	14
3 – Porto di Olbia: elaborazione di analisi di rischio ecologico	15
3.1 – LOE1 Caratterizzazione chimica dei sedimenti	18
3.2 – LOE2 Caratterizzazione chimica colonna d’acqua.....	18
3.3 – LOE3 Biodisponibilità	19
3.4 – LOE4 Biomarker.....	21
3.5 – LOE5 Saggi ecotossicologici.....	22
3.6 – LOE6 Comunità bentoniche	24
3.7 – Elaborazioni ed analisi di rischio ecologico Weight Of Evidence (WOE)	25
4 – Porto di Genova: elaborazione di analisi di rischio ecologico	30
4.1 – LOE1 Caratterizzazione chimica dei sedimenti	32
4.2 – LOE2 Caratterizzazione chimica colonna d’acqua.....	33
4.3 – LOE3 Biodisponibilità	35
4.4 – LOE4 Biomarker.....	37
4.5 – LOE5 Saggi ecotossicologici.....	39

4.6 – Elaborazioni ed analisi di rischio ecologico Weight Of Evidence (WOE)	40
5 – Porto di La Spezia: elaborazione di analisi di rischio ecologico	44
5.1 – LOE1 Caratterizzazione chimica dei sedimenti	46
5.2 – LOE2 Caratterizzazione chimica colonna d’acqua.....	47
5.3 – LOE3 Biodisponibilità	48
5.4 – LOE4 Biomarker.....	50
5.5 – LOE5 Saggi ecotossicologici.....	51
5.6 – Elaborazioni ed analisi di rischio ecologico Weight Of Evidence (WOE)	52
6 – Porto di Tolone: elaborazione di analisi di rischio ecologico	59
6.1 – LOE1 Caratterizzazione chimica dei sedimenti	60
6.2 – LOE2 Caratterizzazione chimica colonna d’acqua.....	61
6.3 – LOE5 Saggi ecotossicologici.....	62
6.4 – Elaborazioni ed analisi di rischio ecologico Weight Of Evidence (WOE)	63
7 – Indici integrati specifici per i porti coinvolti nel progetto	67
8 - Bibliografia	70

1 - Introduzione

Lo scopo complessivo dello studio è stato quello di effettuare una valutazione approfondita delle condizioni ambientali nelle aree portuali di Olbia, Genova, La Spezia e Tolone. L'aspetto fondamentale di questo prodotto è stato l'elaborazione dei risultati mediante l'applicazione di criteri di valutazione ponderata e la loro integrazione secondo l'approccio Weight of Evidence (WOE). La valutazione della qualità dell'ambiente marino e l'analisi del rischio ecologico sono problematiche molto complesse che devono essere affrontate mediante approcci multidisciplinari, in grado di fornire il maggior numero di elementi utili a descrivere la complessità di un ecosistema (Benedetti et al., 2014; Regoli et al., 2014, 2019). È al tempo stesso fondamentale che la complessità scientifica di dati ambientali eterogenei possa essere elaborata in maniera integrata, con lo sviluppo di indici e scale sia quantitative che qualitative, fornendo una caratterizzazione sintetica del rischio che, pur mantenendo il rigore scientifico delle elaborazioni, garantisca una più facile comunicazione agli organi di competenza. Per questo studio abbiamo parzialmente rielaborato e applicato il modello WOE SediquaSoft che, integra differenti tipologie di dati (o Linee di Evidenza, LOE), tra cui la caratterizzazione chimica dei sedimenti e della colonna d'acqua, la misura del bioaccumulo in organismi bioindicatori, le risposte dei biomarker, l'applicazione di saggi ecotossicologici e la valutazione delle comunità bentoniche. I risultati di ciascuna LOE vengono inizialmente analizzati all'interno di specifici moduli, che utilizzano flowchart e algoritmi matematici appropriati per elaborare ampi data-sets di dati applicando criteri ponderati. Al termine di questa fase vengono forniti indici di pericolo specifici per ciascuna LOE, che sono poi integrati, dando loro un peso diverso in funzione della rilevanza ecologica di ciascuna tipologia di indagine, per l'elaborazione finale di un indice di rischio complessivo (Regoli et al., 2014, 2019; Morroni et al., 2020).

L'applicazione dei criteri di integrazione ponderata presenta il vantaggio di abbandonare la logica delle valutazioni basate esclusivamente su approcci tabellari, ed

Prodotto n. T2.1.2

è già stata validata in numerosi casi studio che includono studi su sedimenti inquinati, risorgenze naturali e sversamenti di idrocarburi, emergenze ambientali come il naufragio della Costa Concordia, valutazioni in aree marine complesse tra cui le zone portuali o impattate da scarichi minerari e industriali, caratterizzazione di campi off-shore (Piva et al., 2011; Benedetti et al., 2012, 2014; Regoli et al., 2014; Bebianno et al., 2015; Frantzen et al., 2016; Mestre et al., 2017; Lehtonen et al., 2019; Regoli et al., 2019; Morroni et al., 2020).

2 - Applicazione dei criteri di integrazione ponderata per l'elaborazione dei dati chimici e biologici

Tutti i dati sono stati elaborati con il modello di analisi di rischio (Sediqualssoft; Prodotto T2.1.1. Definizione del modello concettuale per la creazione dell'indice integrato) basato su un approccio quantitativo del tipo Weight Of Evidence (WOE), in grado di integrare i risultati ottenuti da diverse tipologie di indagine (o linee di evidenza, LOEs), nella valutazione di rischio ecologico.

Questo modello contiene specifici algoritmi e diagrammi di flusso che, sulla base di precisi obiettivi ed assunzioni da giudizio esperto, permettono di applicare criteri di integrazione ponderata ad ampi data-sets di dati ottenuti da 6 linee di evidenza: caratterizzazione chimica dei sedimenti (LOE-1), caratterizzazione chimica della colonna d'acqua (LOE-2), biodisponibilità dei contaminanti in organismi bioindicatori (LOE-3), effetti subletali misurati tramite batterie di biomarker (LOE-4), effetti tossici misurati tramite applicazione di saggi ecotossicologici (LOE-5), analisi delle comunità bentoniche (LOE-6). I dati sono analizzati all'interno di specifici moduli in grado di fornire per ciascuna tipologia di dati, sia un indice quantitativo di pericolo (HQ, Hazard Quotient), che un giudizio sintetico del livello di pericolo (suddiviso in 5 classi da assente a molto alto). Queste procedure di calcolo sono state ulteriormente sviluppate all'interno di un Software dedicato che, nonostante l'elaborazione di dati complessi in indici sintetici, mantiene tuttavia informazioni di grande importanza e valore scientifico utili per eventuali approfondimenti. Il modello Sediqualssoft prevede poi un modulo di elaborazione finale WOE che integra le diverse linee di evidenza, dando un peso diverso in funzione della loro rilevanza ai fini dell'indagine, per arrivare alla valutazione sia quantitativa che qualitativa del Rischio Ecologico.

2.1 Criteri di integrazione ponderata per l'elaborazione dei dati chimici dei sedimenti

I risultati analitici ottenuti per i sedimenti sono stati elaborati mediante il software SediQualsoft (Prodotto T2.1.1. Definizione del modello concettuale per la creazione dell'indice integrato). Attraverso l'utilizzo dei criteri di integrazione ponderata viene abbandonata la logica del superamento del valore tabellare, anche minimo da parte di un unico parametro, come principio fondamentale per la caratterizzazione chimica.

Tutti i parametri chimici di cui è prevista l'analisi hanno un "peso", che permette di conferire una maggiore rilevanza nella classificazione chimica dei sedimenti alla variazione di quegli inquinanti che siano caratterizzati da una più elevata tossicità, tendenza al bioaccumulo o persistenza in ambiente.

L'elaborazione dei dati chimici inizia con il confronto delle concentrazioni misurate per ciascun parametro rispetto ai valori indicati nei riferimenti normativi o SQA adottati in funzione dell'obiettivo di protezione scelto. In questo studio i riferimenti utilizzati per i vari parametri chimici sono quelli relativi ai limiti L2 previsti dal DM 173/2016 sulla caratterizzazione e classificazione della qualità dei sedimenti marini soggetti ad attività di movimentazione.

Successivamente, per ciascun parametro chimico analizzato, viene calcolata la variazione rispetto al limite di riferimento, cioè il Ratio To Reference (RTR). Il valore di RTR viene corretto in funzione del "peso" del contaminante per poter ottenere un RTRw (corretto), al fine di enfatizzare l'importanza delle variazioni per i contaminanti più pericolosi.

Il calcolo di pericolo chimico complessivo (Hazard Quotient: HQchimico) viene ricavato dalla media di tutti gli RTRw dei parametri con $RTR < 1$ (cioè con valori inferiori alle soglie di riferimento), addizionato con la sommatoria $\sum$ degli RTRw di tutti i contaminati $RTR > 1$.

I coefficienti N e M indicano il numero dei parametri con RTR rispettivamente < 0 o > 1 , mentre j e k sono indici che permettono di ripetere il calcolo per N o M volte.

Il risultato di tale algoritmo rappresenterà l'indice chimico complessivo HQc; tale indice verrà poi classificato, assegnando al medesimo, una classe di pericolo (da Assente a Molto Alto), caratterizzata da un diverso colore in base alla gravità.

Poiché la procedura di calcolo non cambia in funzione del tipo di riferimento scelto per il confronto, i dati chimici possono essere elaborati contemporaneamente per ottenere un valore di HQc ed una classe di pericolo chimico nei confronti di altri riferimenti adottati a livello locale o, al contrario, da norme internazionali.

2.2 Criteri di integrazione ponderata per l'elaborazione dei dati chimici della colonna d'acqua

I risultati analitici ottenuti per la colonna d'acqua sono stati elaborati mediante il software SediQualsoft (Prodotto T2.1.1. Definizione del modello concettuale per la creazione dell'indice integrato). Il modulo per l'elaborazione dell'indice di pericolo relativo alla caratterizzazione chimica dell'acqua è sostanzialmente basato sullo stesso algoritmo di calcolo già descritto per la linea di evidenza precedente, adeguato tuttavia per quanto riguarda i limiti e i riferimenti normativi utilizzati per il confronto con i risultati dell'indagine.

Anche in questo modulo, la prima parte prevede una serie di informazioni generali sul sito e sul campionamento (compresa l'eventuale profondità di prelievo), e poi l'inserimento delle concentrazioni misurate nei vari campioni di acqua per la lista di analiti riportata nel DM 260/2010, tra cui metalli, idrocarburi volatili, idrocarburi alifatici, idrocarburi policiclici aromatici, bifenili policlorurati, pesticidi e composti organoalogenati, organo-stannici, diossine e composti diossino-simili, solventi aromatici, alogenati, nitro-aromatici, fenoli, ammine aromatiche, ecc.

Anche nella LOE-2 ai vari composti è stato assegnato un "peso" compreso tra 1 e 1.3 a seconda della loro presenza nella lista delle sostanze prioritarie o pericolose e prioritarie (Direttiva 2008/105/Ce); questo peso assegnato può essere modificato dall'utente del programma, ed anche la lista dei composti chimici da analizzare è facilmente aggiornabile laddove ci siano esigenze specifiche.

Il funzionamento del modulo della LOE-2 non richiede che tutti gli analiti siano stati analizzati: i valori misurati sono poi confrontati con i riferimenti normativi degli Standard di Qualità Ambientale (SQA) del DM 260 del 2010.

Il calcolo dell'Hazard Quotient specifico per la caratterizzazione chimica dell'acqua è basato sugli stessi criteri, assunzioni e valutazioni da giudizio esperto utilizzate per i sedimenti. Per ogni parametro viene calcolata la variazione rispetto al riferimento, il *Ratio To Reference (RTR)*, successivamente corretta per la tipologia (peso) del contaminante (*RTRw*), per enfatizzare l'importanza dei contaminanti più pericolosi. L'Hazard Quotient specifico per questa LOE calcola un *RTRw* mediato per tutti i parametri con $RTR \leq 1$ (cioè valori inferiori rispetto agli SQA), mentre per quei contaminanti con $RTR > 1$, i singoli *RTRw* vengono addizionati in una sommatoria Σ .

In questa linea di evidenza il modello elabora anche l'indice TRIX che non viene tuttavia utilizzato nell'integrazione finale dell'indice di pericolo chimico dell'acqua (HQ_C) ma, che può essere di supporto.

Basandosi su un giudizio esperto, l'indice di pericolo chimico dell'acqua è assegnato ad una classe di pericolo chimico (da assente a molto alto); l'output del modello fornisce, oltre al valore di HQ_C e al rispettivo livello di pericolo assegnato, anche informazioni aggiuntive importanti quali ad esempio la distribuzione percentuale dei parametri analizzati nelle 5 classi di pericolo.

2.3 Criteri di integrazione ponderata per l'elaborazione dei dati di biodisponibilità

L'elaborazione dei dati di biodisponibilità è fondamentale in quanto permette di stabilire il pericolo associato al possibile trasferimento di contaminanti ambientali al comparto biotico. Nel calcolo del pericolo biodisponibilità (HQ_{BA}) (Prodotto T2.1.1. Definizione del modello concettuale per la creazione dell'indice integrato), per ciascun parametro viene calcolata la variazione di concentrazione rispetto ai controlli (RTR), corretta ancora una volta in funzione della tipologia del contaminante e della significatività statistica delle differenze ($RTRw$). La significatività statistica della variazione rispetto ai controlli viene pesata applicando il coefficiente Z , calcolato in funzione del valore ottenuto dal test T per dati con varianza disomogenea (punto 4 del flow chart di Figura 6). Il coefficiente Z ha un valore pari a 1 (nessuna riduzione dell'effetto) quando il campione risulta significativamente diverso dal controllo ($p < 0.05$), mentre decresce con il diminuire della significatività, passando in maniera lineare da 1 a 0.5 quando p passa da 0.05 a 0.06; per valori di p superiori a 0.06, il coefficiente Z diminuisce rapidamente in maniera non lineare fino a 0.2 quando p tende a 1. Questa correzione riduce progressivamente il peso complessivo di un parametro la cui variazione media non sia statisticamente significativa, ma non ne elimina completamente il contributo al calcolo dell' HQ_{BA} .

A seconda dell'entità della variazione, che considera anche la variabilità naturale delle concentrazioni tissutali dei contaminanti, i singoli parametri analizzati vengono attribuiti a una di 5 classi di effetto (da assente a molto alto): da assente a lieve se $RTRw < 2.6$, moderato se $2.6 \leq RTRw < 6.5$, elevato se $6.5 \leq RTRw < 13$, e molto alto se $RTRw \geq 13$. Il valore cumulativo di HQ_{BA} viene poi calcolato senza considerare i parametri con $RTRw < 1.3$ (effetto assente), facendo la media per quelli con $RTRw$ tra 1.3 e 2.6 (effetto basso), e sommando (Σ) tutti gli $RTRw > 2.6$ (effetti medio, alto e molto alto): in funzione della distribuzione % dei parametri nelle varie classi di effetto, il modello indica la classe complessiva di pericolo per la biodisponibilità.

2.4 Criteri di integrazione ponderata per l'elaborazione dei dati dei biomarker

Il modulo sulle analisi dei Biomarker può elaborare i risultati ottenuti da un'ampia lista di biomarker tra quelli maggiormente utilizzati dalla comunità scientifica (Prodotto T2.1.1. Definizione del modello concettuale per la creazione dell'indice integrato). A ciascun biomarker è associato un peso compreso tra 1 e 3 a seconda della rilevanza biologica della risposta e del livello di conoscenze sui meccanismi coinvolti; per ciascun biomarker, inoltre, in funzione della specie e del tessuto, è stabilita anche una soglia di variazione biologicamente significativa (*Threshold*) che tiene conto delle possibili risposte bi-fasiche di certi biomarker che possono essere sia indotti che inibiti. Per garantire un approccio multi-biomarker, il modello richiede alcuni requisiti minimi in termini di numero ed importanza dei biomarker analizzati. Per calcolare l'indice cumulativo di pericolo per i biomarker HQ_{BM} , la variazione misurata per ciascun biomarker è confrontata con la soglia specifica (E) e corretta (E_w) sia per l'importanza biologica della risposta, che per la significatività statistica della differenza rispetto al controllo applicando il coefficiente Z già descritto per l'elaborazione dei dati di biodisponibilità. Ogni biomarker è quindi assegnato ad una classe di effetto (da assente a molto alto) a seconda dell'entità della variazione rispetto alla soglia: assente o basso se $E < 1$, medio con E compreso tra 1 e 2, alto se E è tra 2 e 3, molto alto per i biomarker con $E > 3$. I risultati di tutti i biomarker sono diversamente pesati nel calcolo del pericolo cumulativo HQ_{BM} , che non considera il contributo dei biomarker con effetto assente o basso, calcola la media degli E_w per le risposte con effetto moderato e addiziona (Σ) gli E_w delle risposte con effetto alto o molto alto. L'attribuzione di una di 5 classi di gravità deriva dalla distribuzione percentuale delle risposte dei biomarker nelle 5 classi di effetto. Il modello indica il numero di biomarker all'interno di ciascuna delle 5 classi, il valore di pericolo cumulativo HQ_{BM} e la classe di pericolo complessivo per i biomarker.

2.5 Criteri di integrazione ponderata per l'elaborazione dei dati ecotossicologici

L'elaborazione dei risultati ecotossicologici dei sedimenti è stata effettuata applicando i criteri di integrazione ponderata che sono stati recepiti anche dal D.M. n. 173 del 15 luglio 2016 *"Regolamento recante modalità e criteri tecnici per l'autorizzazione all'immersione in mare dei materiali di escavo di fondali marini"* (Prodotto T2.1.1. Definizione del modello concettuale per la creazione dell'indice integrato).

Tali criteri considerano aspetti importanti e caratteristiche specifiche dei singoli saggi biologici utilizzati nella batteria, tra cui la rilevanza tossicologica della risposta biologica misurata, l'entità e la significatività statistica della differenza di effetto tra campione e controllo, la sensibilità della specie testata, la tipologia di esposizione (acuta o cronica) e la matrice testata. In questo senso, per ciascuno dei saggi previsti nelle diverse tipologie di batterie è prevista una "soglia" di effetto che rappresenta la variazione minima ritenuta biologicamente significativa per ciascuna condizione sperimentale, e dei "pesi" che vengono attribuiti a ciascun saggio in funzione della rilevanza biologica dell'end-point misurato, della durata dell'esposizione e della matrice testata (Piva et al., 2011; Benedetti et al., 2012).

Vengono di seguito descritti i passaggi e le procedure di calcolo per l'integrazione dei risultati e la formulazione del giudizio di tossicità.

- dopo la verifica dei dati, per ciascun saggio biologico viene calcolato l'effetto (E_i), inteso come variazione percentuale dell'endpoint misurato, compensato tramite la correzione di Abbott rispetto alle variazioni osservate nel controllo;
- l'effetto E_i viene corretto in base alla significatività statistica della variazione rispetto ai controlli, applicando il coefficiente Z . Questa correzione riduce progressivamente il peso complessivo di un saggio non statisticamente significativo, ma non ne elimina completamente il contributo alla batteria;
- ciascun effetto (E_i) moltiplicato per il suo coefficiente Z , viene rapportato con la "soglia" specifica per quel saggio; l'effetto corretto (E_{iw}) così ottenuto indica di

quante volte la variazione misurata in un saggio supera quella ritenuta biologicamente rilevante;

- solo per determinati saggi, quando sia possibile ottenere un eventuale effetto ormetico (come nel caso della bioluminescenza batterica o della crescita algale), viene assegnato un valore di Ei_w pari a 0 se l'effetto ormetico è $< 40\%$, 1.25 se l'effetto ormetico è $> 40\%$ ma $< 100\%$, pari a 1.5 se l'effetto ormetico è $> 100\%$;
- l'indice di pericolo complessivo della batteria di saggi ecotossicologici (*Hazard Quotient*, $HQ_{Batteria}$) viene calcolato come sommatoria degli effetti pesati (Ei_w) dei singoli saggi, ulteriormente corretti secondo il fattore W_2 che corrisponde al prodotto dei pesi assegnati in funzione della rilevanza biologica dell'endpoint considerato, della rilevanza ecologica della matrice testata e dell'esposizione acuta o cronica degli organismi.
- Per l'attribuzione del livello di pericolo derivante dalla batteria di saggi ecotossicologici, il valore ottenuto per l'indice $HQ_{Batteria}$ è normalizzato ad una scala compresa tra 0 e 10, dove 1 corrisponde al valore di soglia della batteria (cioè il valore di HQ che si otterrebbe se tutti i saggi della batteria mostrassero un effetto pari alla rispettiva soglia) e 10 corrisponde al valore massimo della batteria (quando tutti i saggi mostrano il 100% di effetto). A seconda del valore dell' $HQ_{Batteria}$ normalizzato, il livello di pericolo ecotossicologico viene attribuito ad una classe di gravità (da assente a molto alto), identificata da un diverso colore: Assente/bianco se $HQ_{Batteria} < 1$; Basso/azzurro se $HQ_{Batteria} \geq 1$ e < 1.5 ; Medio/giallo se $HQ_{Batteria} \geq 1.5$ e < 3 ; Alto/rosso se $HQ_{Batteria} \geq 3$ e < 6 ; Molto Alto/nero se $HQ_{Batteria} \geq 6$.

2.6 Criteri di integrazione ponderata per l'elaborazione dei dati delle comunità bentoniche

Il modulo di elaborazione dei dati delle comunità bentoniche calcola in automatico i seguenti descrittori di comunità, indici di diversità tassonomica e indicatori ecologici (Prodotto T2.1.1. Definizione del modello concettuale per la creazione dell'indice integrato):

- *Densità (N)*

Numero complessivo di individui all'interno del campione;

- *Ricchezza specifica (S)*

Rappresentata dal numero di specie presente all'interno di ogni campione;

- *Indice di Margalef (D) o ricchezza specifica*

L'indice di Margalef (Margalef, 1969) è la misura del numero di specie (S) sul totale degli individui presenti N:

$$D = \frac{S - 1}{\ln(N)}$$

- *Diversità di specie o eterogeneità complessiva (H')*

Utilizzando l'indice di Shannon (Shannon e Wiener, 1963) dato dalla formula:

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \log_2 P_i$$

dove S è il numero totale di specie e P la frequenza dell'i-esima specie.

Inoltre, il modulo restituisce lo stato ecologico di qualità (*EcoQ*) basato sull'indice di diversità di Shannon-Wiener proposto da Simboura e Zenetos (*EcoQ_i*; Simboura e Zenetos, 2001) e quello proposto da Vincent (*EcoQ_{ii}*; Vincent, 2002);

- *Equidistribuzione (J)*

Calcolata tramite l'indice di Pielou (Pielou, 1969) che considera la ripartizione delle abbondanze degli individui all'interno delle specie presenti nel campione:

$$J = \frac{H'}{H'_{max}} = \frac{H'}{\log_2 S}$$

dove H' è dato dall'indice di Shannon e S è il numero totale di specie;

- *AMBI (ATZI Marine Biotic Index)*

Prodotto n. T2.1.2

L'indice AMBI (Borja *et al.* 2000) utilizzato per comunità di substrati molli, si basa sulla classificazione delle specie bentoniche in cinque gruppi ecologici che corrispondono a differenti livelli di sensibilità. L'indice considera la composizione del popolamento, assegnando ciascuna specie a un gruppo ecologico a seconda della sua sensibilità o tolleranza allo stress ambientale, consentendo di classificare, come richiesto dalla Direttiva 2000/60/EC, gli ambienti marini costieri.

La formula proposta da Borja *et al.* (2000) è la seguente:

$$AMBI = \frac{[(0 \times \%GI) + (1.5 \times \%GII) + (3 \times \%GIII) + (4.5 \times \%GIV) + (6 \times \%GV)]}{100}$$

dove *GI*=specie sensibili; *GII*=specie indifferenti; *GIII*=specie tolleranti; *GIV*=specie opportuniste di secondo ordine; *GV*=specie opportuniste di primo ordine. Il valore di *AMBI* varia da 0 (ambiente non inquinato o disturbato), a 7 (ambiente estremamente inquinato, azoico).

- *M-AMBI*

L'indice *M-AMBI* (Muxika *et al.*, 2007) è un indice multimetrico che combina con una tecnica di analisi multivariata l'indice *AMBI*, l'indice di diversità di Shannon e l'indice di ricchezza specifica.

M-AMBI fornisce un indice che varia da 0 (stato ecologico cattivo) a 1 (stato ecologico elevato) e i valori di riferimento utilizzati per ciascuna metrica sono quelli previsti dal DM 260 del 2010.

- *BENTIX*

L'indice *BENTIX* (Simboura e Zenetos, 2002) è un altro indice per la valutazione dell'EcoQ e considera la sensibilità/tolleranza degli organismi al disturbo e la loro suddivisione in tre gruppi ecologici. Di seguito la formula per l'indice *BENTIX*:

$$BENTIX = \frac{[6 \times \%GI + 2 \times (\%GII + \%GIII)]}{100}$$

dove *GI*: specie sensibili agli eventi di disturbo; *GII*: specie tolleranti all'inquinamento; *GIII*: include gli opportunisti di primo ordine. Come per l'*AMBI*, il valore di *BENTIX* restituisce una

classificazione del grado di inquinamento e dello stato ecologico.

- *BOPA (Benthic Opportunistic Polychaetes Amphipods Index)*

L'indice *BOPA* (Dauvin e Ruellet, 2007) è basato sul rapporto tra policheti opportunisti e anfipodi (ad eccezione del genere *Jassa*). Gli organismi vengono classificati a livello di famiglia non a livello di specie come gli indici precedenti. L'indice *BOPA* è calcolato come:

$$BOPA = \log \left[\frac{f_p}{f_a + 1} + 1 \right]$$

dove f_p è la frequenza dei policheti opportunisti; f_a è la frequenza degli anfipodi.

Il valore di *BOPA* è basso quando lo stato ambientale è buono, con poche specie opportuniste, e aumenta all'aumentare dell'arricchimento organico.

- *BITS (Benthic Index based on Taxonomic Sufficiency)*

Il *BITS* è un indice sviluppato da Mistri e Munari (2008) specificamente per le lagune costiere mediterranee ed è un indice che classifica gli organismi a livello di famiglia. La formula proposta da Mistri e Munari è la seguente:

$$BITS = \log \left[\frac{6fI + fII}{fIII + 1} + 1 \right] + \log \left[\frac{nI}{nII + 1} + \frac{nI}{nIII + 1} + \frac{0.5nII}{nIII + 1} + 1 \right]$$

dove fI , fII e $fIII$ rappresentano il rapporto tra il numero di individui appartenenti a famiglie sensibili (fI), tolleranti (fII) ed opportuniste ($fIII$) sul totale degli individui raccolti nel campione, mentre nI , nII e $nIII$ rappresentano il numero di famiglie, sensibili (nI), tolleranti (nII) ed opportuniste ($nIII$), presenti nel campione.

Il valore di *BITS* è nullo quando nel campione non sono presenti famiglie sensibili e tolleranti, mentre è elevato quando lo stato ambientale è buono con poche famiglie opportuniste.

La valutazione dell'*EcoQ* con *BITS* varia a seconda del tipo di substrato (sabbia o fango).

2.7 Elaborazione finale Weight of Evidence WOE e definizione dell'indice integrato per gli ambienti portuali

I risultati ottenuti sugli indici di pericolo calcolate per le singole LOEs vengono integrati nella fase finale attraverso un classico approccio WOE che attribuisce pesi diversi alle varie tipologie di dati in funzione della loro rilevanza ecologica. I pesi attribuiti agli indici di pericolo elaborati per le diverse linee di evidenza sono stati: 1.0 per la caratterizzazione chimica dei sedimenti (LOE-1), 0.9 per la caratterizzazione chimica della colonna d'acqua (LOE-2), 1.2 per la biodisponibilità dei contaminanti (LOE-3), 1.0 per le risposte subletali a livello subcellulare misurate tramite biomarker (LOE-4), 1.2 per gli effetti di tossicità acuta a livello di organismo (LOE-5), 1.3 per le analisi delle comunità bentoniche (LOE-6). Dopo la normalizzazione degli indici di pericolo ad una scala comune, l'elaborazione complessiva WOE porta ad una sintesi del rischio che fornisce sia un valore quantitativo che una assegnazione qualitativa ad un livello che va da "Assente" a "Molto Alto" (Benedetti et al., 2014; Regoli et al., 2014; 2019) (Prodotto T2.1.1. Definizione del modello concettuale per la creazione dell'indice integrato).

3 – Porto di Olbia: elaborazione di analisi di rischio ecologico

È oggi universalmente riconosciuto che la caratterizzazione della qualità ambientale e la valutazione del rischio ecologico debbano essere affrontati con approcci multidisciplinari che integrino le tradizionali analisi chimiche nelle matrici abiotiche (acqua e sedimenti), con quelle indicative dell'insorgenza di effetti biologici causati dai contaminanti ai diversi livelli di organizzazione biologica, dai processi di bioaccumulo, alla comparsa di alterazioni molecolari fino alle popolazioni e comunità (Galloway et al., 2004; Chapman, 2007; Viarengo et al., 2007; Regoli et al., 2019).

La combinazione di analisi chimiche e biologiche rappresenta un valore aggiunto per i protocolli di monitoraggio e gestione, ed è in linea con le recenti Direttive Europee che raccomandano l'uso di molteplici indicatori di qualità per valutare lo stato di qualità ambientale degli ecosistemi acquatici, (Galloway et al., 2004; Moore et al., 2006; Chapman, 2007; Hagger et al., 2008; Chapman et al., 2013; Marigómez et al., 2013).

In questo studio è stato applicato un modello di analisi di rischio Weight Of Evidence (WOE), in grado di elaborare tutti i dati attraverso opportuni algoritmi matematici e criteri di valutazione ponderata specifici per le diverse tipologie di indagine (o linee di evidenza, LOE).

I dati raccolti nell'area portuale di Olbia si riferiscono a 6 LOE principali: caratterizzazione chimica dei sedimenti in riferimento ai valori L2 del DM 173/2016 (LOE-1), caratterizzazione chimica della colonna d'acqua in riferimento agli SQA del D. Lgs 172/2015 (LOE-2), biodisponibilità di metalli e di composti organici per i mitili trapiantati (LOE-3), effetti subletali misurati tramite batterie di biomarker nei mitili trapiantati (LOE-4), caratteristiche ecotossicologiche dei sedimenti valutate tramite una batteria di saggi biologici (LOE-5), analisi delle comunità bentoniche nei sedimenti (LOE-6) (Tabella 3.1).

L'applicazione dei criteri di integrazione ponderata per l'elaborazione dei dati ha permesso di riassumere ampi data-set di risultati scientifici complessi in una serie di

Prodotto n. T2.1.2

indici sintetici di pericolo, ciascuno specifico per ogni tipologia di indagine (o linea di evidenza, LOE). Al di là dell'importanza di avere tutti questi indici sintetici che permettono una più facile valutazione del significato complessivo dei risultati ottenuti per ciascun tipo di analisi, un ulteriore valore aggiunto è l'integrazione ponderata di tipologie di dati diversi ed eterogenei: questo consente di valorizzare un approccio multidisciplinare, ottenendo livelli di valutazione sempre più complessi, fino alla caratterizzazione del rischio ecologico.

Tabella 3.1. Tipologia di dati raccolti nell'area portuale di Olbia nelle diverse campagne.

	LOE	Analisi	Periodo	Campioni
1	Caratterizzazione chimica dei sedimenti	Granulometria Metalli: Al - As - Cd- Cr _{tot} - Cu- Fe- Hg - Ni- Pb- Zn Composti organostannici IPA PCB Idrocarburi aromatici Pesticidi	I Campagna (giugno 2018) II Campagna (maggio 2019) III Campagna (novembre 2019)	- Banchina Isola Bianca (SE-01) Foce Padrongianus (SE-02) - Cala Saccaia (SE-03)
2	Caratterizzazione chimica della Colonna d'acqua	Metalli: Cr _{tot} -Cu - Fe - Mn - Ni - Pb - Zn Altri par.: pH - Temp - Cond - Torb	III Campagna (novembre 2019)	da Pt1 a Pt 10
3	Biodisponibilità <i>Mytilus galloprovincialis</i>	Metalli: As - Cd - Cr _{tot} - Cu- Hg - Ni- Pb- Zn Composti organostannici IPA PCB Idrocarburi aromatici Pesticidi	I Campagna (giugno 2018) II Campagna (maggio 2019)	- Banchina Isola Bianca (MT-01) Foce Padrongianus (MT-02) - Cala Saccaia (MT-03)
4	Biomarkers <i>Mytilus galloprovincialis</i>	Metallotioneine Acetilcolinesterasi Micronuclei LS NRRT % Fagocitosi Rapporto Gran/Ian	II Campagna (maggio 2019)	- Banchina Isola Bianca (MT-01) Foce Padrongianus (MT-02) - Cala Saccaia (MT-03)
5	Saggi ecotossicologici	Embriotossicità - <i>Paracentrotus lividus</i> Crescita algale - <i>Phaeodactylum tricornutum</i> Bioluminescenza - <i>Aliivibrio fischeri</i> in fase solida	I Campagna (giugno 2018) II Campagna (maggio 2019) III Campagna (novembre 2019)	- Banchina Isola Bianca (SE-01) Foce Padrongianus (SE-02) - Cala Saccaia (SE-03)
6	Comunità bentoniche	Specie/Abbondanza	II Campagna (maggio 2019)	- Banchina Isola Bianca (SE-01) Foce Padrongianus (SE-02) - Cala Saccaia (SE-03)

3.1 – LOE1 Caratterizzazione chimica dei sedimenti

I risultati chimici sono stati elaborati utilizzando i criteri di integrazione ponderata che, nei confronti dei riferimenti normativi del DM 173/16 (L2), elaborano un indice di pericolo chimico basato sul numero dei contaminanti che eccedono il riferimento specifico, la pericolosità di tali parametri, e l'entità degli sforamenti misurati. Questi criteri di integrazione ponderata abbandonano la logica del mero superamento del valore tabellare, anche minimo e da parte di un unico parametro, come principio per la classificazione chimica della qualità dei sedimenti.

Come riportato nella Tabella 3.2, l'elaborazione complessiva di tutti i risultati nei confronti di L2 (DM 173/2016) ha fornito una classe di pericolo chimico Assente per tutti i campioni dell'area portuale di Olbia in tutte le tre campagne, con un indice di pericolo chimico (HQ) sempre inferiore 0,2.

Tabella 3.2. Livelli di pericolo chimico ottenuti dalla elaborazione ponderata dei dati chimici di tutti i sedimenti del porto di Olbia in riferimento ai limiti L2 (DM 173/2016).

Codice Campione	Area	Campagna	HQ	% max/RTR	N. param sfor.	Livello di pericolo chimico
GR-OL-I-SE-01	Banchina Isola Bianca	I	0,09	-	0	ASSENTE
GR-OL-I-SE-02	Foce Padrongianus	I	0,05	-	0	ASSENTE
GR-OL-I-SE-03	Area esterna	I	0,05	-	0	ASSENTE
GR-OL-II-SE-01	Banchina Isola Bianca	II	0,11	-	0	ASSENTE
GR-OL-II-SE-02	Foce Padrongianus	II	0,05	-	0	ASSENTE
GR-OL-II-SE-03	Area esterna	II	0,05	-	0	ASSENTE
GR-OL-III-SE-01	Banchina Isola Bianca	III	0,05	-	0	ASSENTE
GR-OL-III-SE-02	Foce Padrongianus	III	0,04	-	0	ASSENTE
GR-OL-III-SE-03	Area esterna	III	0,09	-	0	ASSENTE

3.2 – LOE2 Caratterizzazione chimica colonna d'acqua

Così come per la LOE1, anche per questa linea di evidenza l'applicazione dei criteri di valutazione ponderata sulla caratterizzazione chimica della colonna d'acqua, abbandona la logica dell'approccio tabellare e del singolo superamento di un

referimento normativo (anche se lieve); si considerano invece i risultati nel loro complesso, dando un peso al numero dei parametri che sfiorano il relativo valore di riferimento, all'entità di tali sforamenti e alla pericolosità dei composti in questione. Come limiti di riferimento e obiettivi di qualità sono stati considerati in questo studio quelli previsti dagli standard di qualità ambientale (SQA) del D. Lgs 172/2015.

Nella Tabella 3.3 sono mostrati i risultati ottenuti dall'elaborazione della caratterizzazione chimica della colonna d'acqua. L'elaborazione ha fornito una classe di pericolo chimico Medio per quasi tutti i campioni, con l'eccezione del campione Pt11 che presenta un livello di pericolo Basso. L'unico parametro che supera i limiti di riferimento normativo è stato il Cr per tutti i campioni.

Tabella 3.3. Livelli di pericolo chimico ottenuti dalla elaborazione ponderata dei dati chimici della colonna d'acqua del porto di Olbia in riferimento ai limiti SQA (D.Lgs. 172/2015).

Codice Campione	Campagna	SQA (D.Lgs.172/15)			
		HQ	% max/RTR	N. param sfor.	Livello di pericolo chimico
Pt 1	III	3.09	100 - Cr	1	MEDIO
Pt 2	III	3.34	100 - Cr	1	MEDIO
Pt 3	III	3.97	100 - Cr	1	MEDIO
Pt 4	III	4.23	100 - Cr	1	MEDIO
Pt 5	III	3.95	100 - Cr	1	MEDIO
Pt 6	III	3.23	100 - Cr	1	MEDIO
Pt 7	III	2.83	100 - Cr	1	MEDIO
Pt 8	III	2.81	100 - Cr	1	MEDIO
Pt 9	III	2.85	100 - Cr	1	MEDIO
Pt 10	III	2.65	100 - Cr	1	MEDIO
Pt 11	III	2.46	100 - Cr	1	BASSO

3.3 – LOE3 Biodisponibilità

Per il bioaccumulo, in ogni campagna sono stati misurati negli organismi della specie *Mytilus galloprovincialis* i livelli di concentrazione degli stessi contaminanti tenuti

in considerazione nella LOE 1, potendo così stabilire la possibilità per i contaminanti presenti nel sedimento di riuscire a trasferirsi nel comparto biotico. Per ogni sito sono stati calcolati, attraverso l'utilizzo del modello Weight Of Evidence, il valore di pericolo cumulativo HQ sulla base di tutti i valori di RTR. RTR rappresenta il rapporto tra la concentrazione dell'analita misurata nel tessuto dell'organismo esposto e la concentrazione dello stesso analita nel tessuto dell'organismo utilizzato come controllo, che poi viene corretto in funzione della natura del contaminante e della significatività statistica delle differenze.

L'elaborazione complessiva dei risultati tramite i criteri di integrazione ponderata ha confermato un livello di bioaccumulo Basso o Assente in tutti i mitili traslocati del porto di Olbia, in funzione del numero, dell'entità e della significatività statistica delle differenze misurate. (Tabella 3.4).

Tabella 3.4. Risultati della elaborazione complessiva del pericolo di bioaccumulo nei tessuti di mitili del porto di Olbia.

Codice Campione	Sito	Campagna	Numero parametri assegnati alle diverse classi					HQ	Livello di pericolo
			Assente	Basso	Medio	Alto	Molto Alto		
GR-OL-I-MT-01	Banchina Isola Bianca	I	36	6	1	0	0	6.12	BASSO
GR-OL-I-MT-02	Foce Padrongianus	I	34	9	0	0	0	1.45	BASSO
GR-OL-I-MT-03	Cala Saccaia	I	43	0	0	0	0	0	ASSENTE
GR-OL-PL-I-MT-01	Banchina Isola Bianca	I	37	5	1	0	0	5.44	BASSO
GR-OL-PL-I-MT-02	Foce Padrongianus	I	39	3	1	0	0	4.71	BASSO
GR-OL-PL-I-MT-03	Cala Saccaia	I	43	0	0	0	0	0	ASSENTE
GR-OL-II-MT-01	Banchina Isola Bianca	II	40	3	0	0	0	1.63	BASSO
GR-OL-II-MT-02	Foce Padrongianus	II	42	1	0	0	0	1.58	BASSO
GR-OL-II-MT-03	Cala Saccaia	II	43	0	0	0	0	0	ASSENTE
GR-OL-PL-II-MT-01	Banchina Isola Bianca	II	30	12	1	0	0	4.57	BASSO
GR-OL-PL-II-MT-02	Foce Padrongianus	II	34	9	0	0	0	1.59	BASSO
GR-OL-PL-II-MT-03	Cala Saccaia	II	43	0	0	0	0	0	ASSENTE
GR-OL-PL-III-MT-01	Banchina Isola Bianca	III	34	8	1	0	0	4.35	BASSO
GR-OL-PL-III-MT-02	Foce Padrongianus	III	33	8	2	0	0	7.72	BASSO
GR-OL-PL-III-MT-03	Cala Saccaia	III	43	0	0	0	0	0	ASSENTE

3.4 – LOE4 Biomarker

I risultati dei biomarker ottenuti per gli organismi traslocati sono stati elaborati tramite l'applicazione di criteri di integrazione ponderata che riassumono un indice di pericolo basato sul numero e sulla rilevanza tossicologica dei biomarker analizzati, sulla

significatività statistica e sull'entità delle variazioni osservate rispetto a specifiche soglie di riferimento.

I risultati di queste elaborazioni sono rappresentati nella Tabella 3.5. Il livello di pericolo elaborato per i biomarker è stato Assente/Basso per il sito "Banchina Isola Bianca" e il sito "Cala Saccaia", invece il sito "Foce Padrongianus" ha presentato un livello di pericolo Medio.

Tabella 3.5. Risultati della elaborazione complessiva del pericolo relativo ai biomarker nei mitili del porto di Olbia.

Codice Campione	Sito	Campagna	Numero biomarker assegnati alle diverse classi					Livello di pericolo
			Assente	Basso	Medio	Alto	Molto Alto	
GR-OL-II-MT-01	Banchina Isola Bianca	II	4	2	0	0	0	BASSO
GR-OL-II-MT-02	Foce Padrongianus	II	4	1	0	0	1	MEDIO
GR-OL-II-MT-03	Cala Saccaia	II	6	0	0	0	0	ASSENTE

3.5 – LOE5 Saggi ecotossicologici

La Tabella 3.6 mostra i risultati complessivi della elaborazione della batteria dei saggi ecotossicologici che ha previsto l'analisi della bioluminescenza nel batterio *Aliivibrio fischeri* esposto alla fase solida, la crescita algale di *Phaeodactylum tricornutum*, l'embriotossicità nel *Paracentrotus lividus*.

I criteri di integrazione ponderata consentono di abbandonare il principio della classificazione ecotossicologica determinata dal risultato peggiore: il giudizio sull'intera batteria dipende dalla rilevanza tossicologica dell'endpoint misurato in ciascun saggio, dalla soglia di sensibilità della specie, dalla significatività statistica ed entità delle variazioni misurate, dalle condizioni di saggio.

Prodotto n. T2.1.2

La classe di pericolo ecotossicologico elaborata per i campioni di sedimento è risultata Assente, ad eccezione dei campioni GR-OL-II-SE-01 e GR-OL-II-SE-02 della seconda campagna che hanno evidenziato una classe di pericolo ecotossicologico Medio. In generale, il saggio con *P. lividus* è stato quello che ha contribuito maggiormente alla tossicità complessiva della batteria.

Tabella 3.6 Risultati della elaborazione complessiva del pericolo ecotossicologico per il porto di Olbia mediante criteri di integrazione ponderata sulle batterie di saggi costituite da *Paracentrotus Lividus*, *Aliivibrio fischeri* e *Phaeodactylum tricornutum*.

Codice Campione	Sito	Campagna	Specie	HQ Specifico	HQ Batteria	Livello di pericolo
GR-OL-I-SE-03	Area esterna	I	<i>P. lividus</i>	0.38	0.65	ASSENTE
			<i>P. tricornutum</i>	1.29		
			<i>A. fischeri</i>	0.71		
GR-OL-I-SE-01	Banchina Isola Bianca	I	<i>P. lividus</i>	1.04	0.38	ASSENTE
			<i>P. tricornutum</i>	0		
			<i>A. fischeri</i>	0.34		
GR-OL-I-SE-02	Foce Padrongianus	I	<i>P. lividus</i>	1.75	0.86	ASSENTE
			<i>P. tricornutum</i>	1.29		
			<i>A. fischeri</i>	0.11		
GR-OL-II-SE-01	Banchina Isola Bianca	II	<i>P. lividus</i>	6.21	2.95	MEDIO
			<i>P. tricornutum</i>	1.29		
			<i>A. fischeri</i>	0		
GR-OL-II-SE-02	Foce Padrongianus	II	<i>P. lividus</i>	4.51	2.18	MEDIO
			<i>P. tricornutum</i>	1.29		
			<i>A. fischeri</i>	0.07		
GR-OL-II-SE-03	Area esterna	II	<i>P. lividus</i>	0.01	0.38	ASSENTE
			<i>P. tricornutum</i>	1.29		
			<i>A. fischeri</i>	0		
GR-OL-III-SE-01	Banchina Isola Bianca	III	<i>P. lividus</i>	0.02	0.75	ASSENTE
			<i>P. tricornutum</i>	1.29		
			<i>A. fischeri</i>	1.23		
GR-OL-III-SE-02	Foce Padrongianus	III	<i>P. lividus</i>	0.01	0.97	ASSENTE
			<i>P. tricornutum</i>	0		
			<i>A. fischeri</i>	3.3		
GR-OL-III-SE-03	Area esterna	III	<i>P. lividus</i>	1.57	0.55	ASSENTE
			<i>P. tricornutum</i>	0		
			<i>A. fischeri</i>	0.29		

3.6 – LOE6 Comunità bentoniche

In questo studio, per la valutazione delle comunità nel porto di Olbia, è stata ritenuta appropriata l'applicazione dell'indice AMBI: questo indice è stato ottimizzato per riassumere lo stato ecologico sulla base della risposta delle comunità bentoniche di fondi mobili a disturbi di tipo antropico.

I risultati complessivi hanno evidenziato una classificazione dello stato ecologico tra buono e medio per tutti i campioni del porto di Olbia, ed un range dei valori dell'indice AMBI compreso tra 1,4 (OL26) e 1,7 (OL17) (Tabella 3.7).

L'elaborazione complessiva dei dati sulle comunità bentoniche attraverso la LOE 6 del modello Weight Of Evidence ha fornito una classe di pericolo Basso o Medio nei tre campioni del porto di Olbia (Tabella 3.7).

Tabella 3.7 Indice di qualità ecologica (AMBI) elaborato per il porto di Olbia. Classi di pericolo ecologico ottenute mediante elaborazione complessiva di tutti i dati disponibili per le comunità bentoniche.

Codice Campione	AMBI					HQ	Livello di pericolo
	Classificazione Stato Ecologico	IB media $\pm$ dev.st	Classificazione disturbo del sito	Gruppo ecologico dominante	Condizioni della comunità		
OL14	Buono	1,5 $\pm$ 0,5	Lievemente disturbato	III	Umbalanced	36.1	BASSO
OL17	Medio	1,7 $\pm$ 0,4	Mediamente disturbato	III	Transitional to pollution	45.4	MEDIO
OL26	Buono	1,4 $\pm$ 0	Lievemente disturbato	III	Umbalanced	25.4	BASSO

3.7 – Elaborazioni ed analisi di rischio ecologico Weight Of Evidence (WOE)

Gli indici di pericolo HQ delle singole linee di evidenza, di ogni sito sono stati integrati tra di loro, normalizzandoli ad una scala comune, in modo da ricavare un singolo giudizio univoco e complessivo Weight Of Evidence (WOE).

Nella Tabella 3.8 viene riportato, per ciascuna sito, sia l'indice di pericolo già elaborato e discusso per ciascuna LOE, che l'indice di rischio integrato WOE. L'indice di rischio WOE risulta Assente o Basso per tutti i siti nelle 3 campagne, consentendo di escludere situazioni compromesse sia a livello di singoli comparti ambientali che come caratteristiche complessive dell'area portuale di Olbia (Figure 3.1 - 3.2 - 3.3).

Prodotto n. T2.1.2

Tabella 3.8 Riassunto dei risultati relativi alle singole elaborazioni ponderate (LOE1, LOE2, LOE3, LOE4, LOE5 e LOE6) ed integrazione complessiva WOE (Weight of Evidence).

Sito	Campagna	LIVELLO DI PERICOLO						WOE	
		chimico sedimenti LOE 1	chimico colonna d'acqua LOE 2	bioaccumulo LOE 3	biomarker LOE 4	saggi ecotossicologici LOE 5	comunità bentoniche LOE 6		
Banchina Isola Bianca	I (giugno 2018)	ASSENTE		BASSO		ASSENTE		ASSENTE	
Foce Padrongianus		ASSENTE		BASSO		ASSENTE		ASSENTE	
Area esterna		ASSENTE		ASSENTE		ASSENTE		ASSENTE	
Banchina Isola Bianca	II (maggio 2019)	ASSENTE		BASSO	BASSO	MEDIO	BASSO	BASSO	
Foce Padrongianus		ASSENTE		BASSO	MEDIO	MEDIO	MEDIO	BASSO	
Area esterna		ASSENTE		ASSENTE	ASSENTE	ASSENTE	BASSO	ASSENTE	
Banchina Isola Bianca	III	ASSENTE	MEDIO			ASSENTE		BASSO	

Foce Padrongianus	(novembre 2019)	ASSENTE	MEDIO			ASSENTE		BASSO	
Area esterna		ASSENTE	MEDIO			ASSENTE		BASSO	



Figura 3.1 Elaborazione complessiva WOE (Output modello SediquaSoft®). Le classi di rischio sono espresse tramite i colori (bianco: assente; celeste: basso; giallo: medio; rosso: alto; nero: molto alto). Campagna I (giugno 2018).



Figura 3.2 Elaborazione complessiva WOE (Output modello Sediqualsoft®). Le classi di rischio sono espresse tramite i colori (bianco: assente; celeste: basso; giallo: medio; rosso: alto; nero: molto alto). Campagna II (maggio 2019).



Figura 3.3 Elaborazione complessiva WOE (Output modello SediquaSoft®). Le classi di rischio sono espresse tramite i colori (bianco: assente; celeste: basso; giallo: medio; rosso: alto; nero: molto alto). Campagna III (novembre 2019)

4 – Porto di Genova: elaborazione di analisi di rischio ecologico

I dati raccolti nell'area portuale di Genova si riferiscono a 5 LOE principali: caratterizzazione chimica dei sedimenti in riferimento ai valori L2 del DM 173/2016 (LOE-1), caratterizzazione chimica della colonna d'acqua in riferimento agli SQA del D. Lgs 172/2015 (LOE-2), biodisponibilità di metalli, composti organici per i mitili trapiantati e per i pesci (LOE-3), effetti subletali misurati tramite batterie di biomarker nei mitili trapiantati (LOE-4), caratteristiche ecotossicologiche dei sedimenti valutate tramite una batteria di saggi biologici (LOE-5) (Tabella 4.1).

Tabella 4.1. Tipologia di dati raccolti nell'area portuale di Genova nelle diverse campagne.

	LOE	Analisi	Periodo	Campioni
1	Caratterizzazione chimica dei sedimenti	Granulometria Metalli: As - Cd- Cr _{tot} - Cu- Fe- Hg - Ni- Pb- Zn Composti organostannici IPA PCB Idrocarburi aromatici Pesticidi	I Campagna (dicembre 2018) II Campagna (maggio 2019)	- Diga foranea imboccatura levante (SE-01) - Porto antico (SE-02) - Foce Polcevera (SE-03)
2	Caratterizzazione chimica della Colonna d'acqua	Metalli: Al - As - Cr _{tot} - Cu - Fe - Mn - Ni - Pb - V - Zn Altri par.: Chla - %OD - NO ₃ - PO ₄ - pH - Temp - Cond - Torb	I Campagna (dicembre 2018) II Campagna (maggio 2019)	da Pt1 a Pt 15
3	Biodisponibilità <i>Mytilus galloprovincialis</i> (MT) <i>Liza aurata</i> (PE)	Metalli: Al (PE) - As - Cd - Cr _{tot} - Cu- Fe (PE) - Hg - Mn (PE) Ni- Pb - Sb (PE) - Zn Composti organostannici (MT) IPA (MT) PCB (MT) Idrocarburi aromatici (MT) Pesticidi (MT)	I Campagna (dicembre 2018) (MT) II Campagna (maggio 2019) (MT - PE)	- Diga foranea imboccatura levante (MT-01 / PE-01) - Porto antico (MT-02 / PE-02) - Foce Polcevera (MT-03 / PE-03)
4	Biomarkers <i>Mytilus galloprovincialis</i> (MT) <i>Liza aurata</i> (PE)	Metallotioneine (MT) Acetilcolinesterasi (MT) Micronuclei (MT) LS NRRT (MT) % Fagocitosi (MT) Rapporto Gran/Ian (MT) Metaboliti Pyr - Met. BaP - Met. NAP (PE) EROD (PE)	I Campagna (dicembre 2018) (MT) II Campagna (maggio 2019) (MT - PE)	- Diga foranea imboccatura levante (MT-01 / PE-01) - Porto antico (MT-02 / PE-02) - Foce Polcevera (MT-03 / PE-03)
5	Saggi ecotossicologici	Embriotossicità - <i>Paracentrotus Lividus</i> Crescita algale - <i>Phaeodactylum tricornutum</i> Bioluminescenza - <i>Aliivibrio fischeri</i> in fase solida	I Campagna II Campagna	- Diga foranea imboccatura levante (SE-01) - Porto antico (SE-02) - Foce Polcevera (SE-03)

4.1 – LOE1 Caratterizzazione chimica dei sedimenti

I risultati chimici sono stati elaborati utilizzando i criteri di integrazione ponderata che, nei confronti dei riferimenti normativi del DM 173/16 (L2), elabora un indice di pericolo chimico basato sul numero dei contaminanti che eccedono il riferimento specifico, la pericolosità di tali parametri, e l'entità degli sforamenti misurati. Questi criteri di integrazione ponderata abbandonano la logica del mero superamento del valore tabellare, anche minimo e da parte di un unico parametro, come principio per la classificazione chimica della qualità dei sedimenti.

Come riportato nella Tabella 4.2, l'elaborazione ha fornito una classe di pericolo chimico da Assente a Medio per i campioni della prima campagna (GR-GE-I-SE-01: Assente; GR-GE-I-SE-02: Basso e GR-GE-I-SE-03: Medio), mentre il livello di pericolo chimico nella seconda campagna è risultato Basso per il campione GR-GE-II-SE-01, Medio per il campione GR-GE-II-SE-03 e Alto per il campione GR-GE-II-SE-03. Nella prima campagna, i composti che hanno fornito il contributo percentualmente superiore all'indice di pericolo chimico sono stati il Ni per la "Foce Polcevera" e lo Zn per il sito "Porto antico"; anche nella seconda campagna i metalli sono risultati i composti con il contributo maggiore per l'indice di pericolo (Pb per la "Diga foranea imboccatura levante"; Hg per il "Porto antico"; Ni per la "Foce Polcevera").

L'applicazione di criteri di valutazione ponderata sulla caratterizzazione chimica dei sedimenti ha permesso di osservare alcune differenze tra il pericolo chimico evidenziato per i tre siti della prima campagna rispetto a quello osservato nella seconda campagna, con un passaggio di classe evidenziato per i siti "Diga foranea imboccatura levante" e "Porto antico"; non si osservano invece differenze per la "Foce Polcevera" che presenta un livello di pericolo chimico Medio in entrambe le campagne.

Tabella 4.2. Livelli di pericolo chimico ottenuti dalla elaborazione ponderata dei dati chimici di tutti i sedimenti del porto di Genova in riferimento ai limiti L2 (DM 173/2016).

Codice Campione	Area	Campagna	HQ	% max/RTR	N. param sfor.	Livello di pericolo chimico
GR-GE-I-SE-01	Diga foranea imboccatura levante	I	0,23	-	0	ASSENTE
GR-GE-I-SE-02	Porto antico	I	1,33	100 - Zn	1	BASSO
GR-GE-I-SE-03	Foce Polcevera	I	5,22	37,3 - Ni	3	MEDIO
GR-GE-II-SE-01	Diga foranea imboccatura levante	II	1,36	100 - Pb	1	BASSO
GR-GE-II-SE-02	Porto antico	II	6,72	33,8 - Hg	4	ALTO
GR-GE-II-SE-03	Foce Polcevera	II	5,43	36,6 - Ni	3	MEDIO

4.2 – LOE2 Caratterizzazione chimica colonna d'acqua

Così come per la LOE1 anche per questa linea di evidenza, l'applicazione di criteri di valutazione ponderata sulla caratterizzazione chimica della colonna d'acqua, abbandona la logica dell'approccio tabellare e del singolo superamento di un riferimento normativo (anche se lieve), considera invece i risultati nel loro complesso, dando un peso al numero dei parametri che sfiorano il valore di riferimento, all'entità di tali sforamenti e alla pericolosità dei composti in questione. Come obiettivi di qualità sono stati considerati in questo studio quelli previsti dagli standard di qualità ambientale (SQA) del D. Lgs 172/2015.

Nella Tabella 4.3 sono mostrati i risultati ottenuti dalla caratterizzazione chimica della colonna d'acqua, con l'elaborazione che ha fornito una classe di pericolo chimico Assente o Basso per quasi tutti i campioni, con l'eccezione del campione Pt3 della seconda campagna che presenta un livello di pericolo Medio.

Prodotto n. T2.1.2

Inoltre, il modulo della LOE2 calcola l'indice TRIX, indice di stato trofico per definire lo stato di qualità delle acque marino costiere. La classificazione di qualità ottenuta da questo indice ha mostrato per i campioni della prima campagna una classe di qualità da "Medio" a "Elevato", con l'eccezione di due campioni (Pt1 e Pt10) che presentano una classe "Scadente". Nella seconda campagna si evidenzia uno stato trofico da "Buono" a "Elevato" ad eccezione del campione Pt1 (stato trofico: "Scadente").

Tabella 4.3. Livelli di pericolo chimico ottenuti dalla elaborazione ponderata dei dati chimici della colonna d'acqua del porto di Genova in riferimento ai limiti SQA (D.Lgs. 172/2015).

Codice Campione	Campagna	SQA (D.Lgs.172/15)				TRIX	CLASSE TRIX
		HQ	% max/RTR	N. param sfor.	Livello di pericolo chimico		
Pt 1	I	0.1		0	ASSENTE	6	Scadente
Pt 2	I	0.14		0	ASSENTE	5.8	Medio
Pt 3	I	0.11		0	ASSENTE	5.6	Medio
Pt 4	I	0.09		0	ASSENTE	5.5	Medio
Pt 5	I	0.06		0	ASSENTE	4.9	Buono
Pt 6	I	0.05		0	ASSENTE	5.3	Medio
Pt 7	I	0.02		0	ASSENTE	5.2	Medio
Pt 8	I	0.08		0	ASSENTE	5.2	Medio
Pt 9	I	0.07		0	ASSENTE	5.9	Medio
Pt 10	I	0.09		0	ASSENTE	6.9	Scadente
Pt 11	I	0.05		0	ASSENTE	5.9	Medio
Pt 12	I	0.03		0	ASSENTE	5.6	Medio
Pt 13	I	0.04		0	ASSENTE	5.4	Medio
Pt 14	I	0.02		0	ASSENTE	3.7	Elevato
Pt 15	I	0.02		0	ASSENTE	3.5	Elevato
Pt 1	II	0.75		0	TRASCURABILE	6	Scadente
Pt 2	II	1.76	100 - Cr	1	BASSO	4	Buono
Pt 3	II	3.77	50.6 - Cr	2	MEDIO	3.7	Elevato
Pt 4	II	0.58		0	ASSENTE	3.6	Elevato
Pt 5	II	0.43		0	ASSENTE	3.4	Elevato
Pt 6	II	0.4		0	ASSENTE		
Pt 7	II	0.35		0	ASSENTE	2.9	Elevato
Pt 8	II	0.48		0	ASSENTE	3.8	Elevato
Pt 9	II	0.42		0	ASSENTE	4.6	Buono
Pt 10	II	0.53		0	ASSENTE		
Pt 11	II	0.45		0	ASSENTE	4.5	Buono
Pt 12	II	0.45		0	ASSENTE		
Pt 13	II	0.32		0	ASSENTE	3.5	Elevato
Pt 14	II	0.28		0	ASSENTE	3.3	Elevato
Pt 15	II	0.32		0	ASSENTE	3.5	Elevato

4.3 - LOE3 Biodisponibilità

L'elaborazione complessiva dei risultati tramite i criteri di integrazione ponderata ha confermato un livello di bioaccumulo Assente o Basso nel sito "Diga foranea imboccatura

Prodotto n. T2.1.2

levante” e “Foce Polcevera (II campagna)” e Medio nei mitili traslocati nel sito “Porto antico”, in funzione del numero, dell’entità e della significatività statistica delle differenze misurate (Tabella 4.4).

Per quanto riguarda i livelli di bioaccumulo nei tessuti dei pesci è risultato in quasi tutti i campioni Medio, ad eccezione di due campioni della quarta campagna (GR-GE-IV-PE-01-B-M, GR-GE-IV-PE-01-F-M) dove è risultato Alto (Tabella 4.5).

Tabella 4.4. Risultati della elaborazione complessiva del pericolo di bioaccumulo nei tessuti di mitili del porto di Genova.

Codice Campione	Sito	Campagna	Numero parametri assegnati alle diverse classi					HQ	Livello di pericolo
			Assente	Basso	Medio	Alto	Molto Alto		
GR-GE-I-MT-01	Diga foranea imboccatura levante	I	43	0	0	0	0	0	ASSENTE
GR-GE-I-MT-02	Porto antico	I	27	5	10	0	1	48.69	MEDIO
GR-GE-II-MT-01	Diga foranea imboccatura levante	II	43	0	0	0	0	0	ASSENTE
GR-GE-II-MT-02	Porto antico	II	16	6	19	2	0	101.41	MEDIO
GR-GE-II-MT-03	Foce Polcevera	II	26	15	2	0	0	8.05	BASSO

Tabella 4.5. Risultati della elaborazione complessiva del pericolo di bioaccumulo nei tessuti dei pesci del porto di Genova.

Codice Campione	Campagna	Numero parametri assegnati alle diverse classi					HQ	Livello di pericolo
		Assente	Basso	Medio	Alto	Molto Alto		
GR-GE-II-PE-01-F-M	II	5	3	3	1	0	19.68	MEDIO
GR-GE-II-PE-01-M-M	II	5	4	2	0	0	7.81	MEDIO
GR-GE-II-PE-02-B-M	II	8	2	0	1	0	12.36	MEDIO
GR-GE-II-PE-02-F-M	II	5	3	3	1	0	19.68	MEDIO
GR-GE-II-PE-02-M-M	II	5	4	2	0	0	7.81	MEDIO
GR-GE-II-PE-03-B-M	II	8	2	0	1	0	12.36	MEDIO
GR-GE-II-PE-03-F-M	II	5	3	3	1	0	19.68	MEDIO
GR-GE-II-PE-03-M-M	II	5	4	2	0	0	7.81	MEDIO
GR-GE-IV-PE-01-B-M	IV	4	5	1	0	1	34.51	ALTO
GR-GE-IV-PE-01-F-M	IV	5	3	3	0	1	28.72	ALTO
GR-GE-IV-PE-01-M-M	IV	7	2	2	0	0	10.09	MEDIO

4.4 – LOE4 Biomarker

Per l'analisi degli effetti biologici indotti dall'esposizione ai contaminanti sono stati selezionati diversi biomarker nei tessuti dei mitili e dei pesci utilizzati come organismi bioindicatori.

I risultati dei biomarker ottenuti per i mitili traslocati nel porto di Genova sono rappresentati nella Tabella 4.6. Il livello di pericolo elaborato per i biomarker è stato Assente/Basso per tutti i campioni.

La tabella 4.7 mostra i risultati dell'elaborazione complessiva dei biomarker ottenuti nei tessuti dei pesci. I livelli di pericolo per i biomarker è risultato Alto in tutti i campioni.

Tabella 4.6. Risultati della elaborazione complessiva del pericolo relativo ai biomarker nei mitili del porto di Genova.

Codice Campione	Sito	Campagna	Numero biomarker assegnati alle diverse classi					Livello di pericolo
			Assente	Basso	Medio	Alto	Molto Alto	
GR-GE-I-MT-01	Diga foranea imboccatura levante	I	6	0	0	0	0	ASSENTE
GR-GE-I-MT-02	Porto antico	I	5	0	0	1	0	BASSO
GR-GE-II-MT-01	Diga foranea imboccatura levante	II	6	0	0	0	0	ASSENTE
GR-GE-II-MT-02	Porto antico	II	5	1	0	0	0	BASSO
GR-GE-II-MT-03	Foce Polcevera	II	6	0	0	0	0	ASSENTE

Tabella 4.7. Risultati della elaborazione complessiva del pericolo relativo ai biomarker nei pesci del porto di Genova.

Codice Campione	Sito	Campagna	Numero parametri assegnati alle diverse classi					Livello di pericolo
			Assente	Basso	Medio	Alto	Molto Alto	
GR-GE-II-PE-03-F-M	Ponte dei Mille	II	1	1	0	1	1	ALTO
GR-GE-II-PE-02-F-M	Ponte dei Mille	II	1	1	0	1	1	ALTO
GR-GE-II-PE-01-F-M	Ponte dei Mille	II	1	1	0	1	1	ALTO

4.5 – LOE5 Saggi ecotossicologici

La Tabella 4.8 mostra i risultati complessivi della elaborazione della batteria dei saggi ecotossicologici effettuati sui sedimenti. In questo studio, la batteria utilizzata ha previsto l'analisi della bioluminescenza nel batterio *Aliivibrio fischeri* esposto alla fase solida, la crescita algale di *Phaeodactylum tricornutum*, l'embriotossicità nel *Paracentrotus lividus*.

La classe di pericolo ecotossicologico elaborata per i campioni di sedimento della prima campagna è risultata Assente. I campioni della seconda campagna hanno mostrato un livello di pericolo ecotossicologico Medio/Alto. In generale, il saggio di embriotossicità con *P. lividus* è stato quello che ha contribuito maggiormente alla tossicità complessiva della batteria.

Tabella 4.8 Risultati della elaborazione complessiva del pericolo ecotossicologico per il porto di Genova mediante criteri di integrazione ponderata sulle batterie di saggi costituite da *Paracentrotus Lividus*, *Aliivibrio fischeri* e *Phaeodactylum tricornutum*.

Codice Campione	Sito	Campagna	Specie	HQ Specifico	HQ Batteria	Livello di pericolo
GR-GE-I-SE-01	Diga foranea imboccatura levante	I	<i>P. lividus</i>	0.06	0.02	ASSENTE
			<i>P. tricornutum</i>	0		
			<i>A. fischeri</i>	0		
GR-GE-I-SE-02	Porto antico	I	<i>P. lividus</i>	0.01	0	ASSENTE
			<i>P. tricornutum</i>	0		
			<i>A. fischeri</i>	0		
GR-GE-I-SE-03	Foce Polcevera	I	<i>P. lividus</i>	1.35	0.88	ASSENTE
			<i>P. tricornutum</i>	0		
			<i>A. fischeri</i>	1.64		
GR-GE-II-SE-01	Diga foranea imboccatura levante	II	<i>P. lividus</i>	6.21	2.95	MEDIO
			<i>P. tricornutum</i>	1.29		
			<i>A. fischeri</i>	0		
GR-GE-II-SE-02	Porto antico	II	<i>P. lividus</i>	6.21	3.01	ALTO
			<i>P. tricornutum</i>	1.29		
			<i>A. fischeri</i>	0.11		
GR-GE-II-SE-03	Foce Polcevera	II	<i>P. lividus</i>	6.21	4.06	ALTO
			<i>P. tricornutum</i>	1.29		
			<i>A. fischeri</i>	2.32		

4.6 – Elaborazioni ed analisi di rischio ecologico Weight Of Evidence (WOE)

Nella Tabella 4.9 viene riportato, per ciascuna sito, sia l'indice di pericolo già elaborato e discusso per ciascuna LOE, che l'indice di rischio integrato WOE. L'indice di rischio WOE per i tre siti del porto di Genova risulta Assente o Basso nella prima campagna e Medio nella seconda campagna. (Figure 4.1 - 4.2).

Prodotto n. T2.1.2

Tabella 4.9 Riassunto dei risultati relativi alle singole elaborazioni ponderate (LOE1, LOE2, LOE3, LOE4 e LOE5) ed integrazione complessiva WOE (Weight of Evidence).

Sito	Campagna	LIVELLO DI PERICOLO					WOE	
		chimico sedimenti LOE 1	chimico colonna d'acqua LOE 2	bioaccumulo LOE 3	biomarker LOE 4	saggi ecotossicologici LOE 5		
Diga foranea imboccatura levante	I (dicembre 2018)	ASSENTE	ASSENTE	ASSENTE	ASSENTE	ASSENTE	ASSENTE	
Porto antico		BASSO	ASSENTE	MEDIO	BASSO	ASSENTE	BASSO	
Foce Polcevera		MEDIO	ASSENTE			ASSENTE	BASSO	
Diga foranea imboccatura levante	II (maggio 2019)	BASSO	ASSENTE	MEDIO	MEDIO	MEDIO	MEDIO	
Porto antico		ALTO	TRASCURABILE	MEDIO	MEDIO	ALTO	MEDIO	
Foce Polcevera		MEDIO	ASSENTE	MEDIO	ALTO	ALTO	MEDIO	



Figura 4.1 Elaborazione complessiva WOE (Output modello SediquaSoft®). Le classi di rischio sono espresse tramite i colori (bianco: assente; celeste: basso; giallo: medio; rosso: alto; nero: molto alto). Campagna I (dicembre 2018)

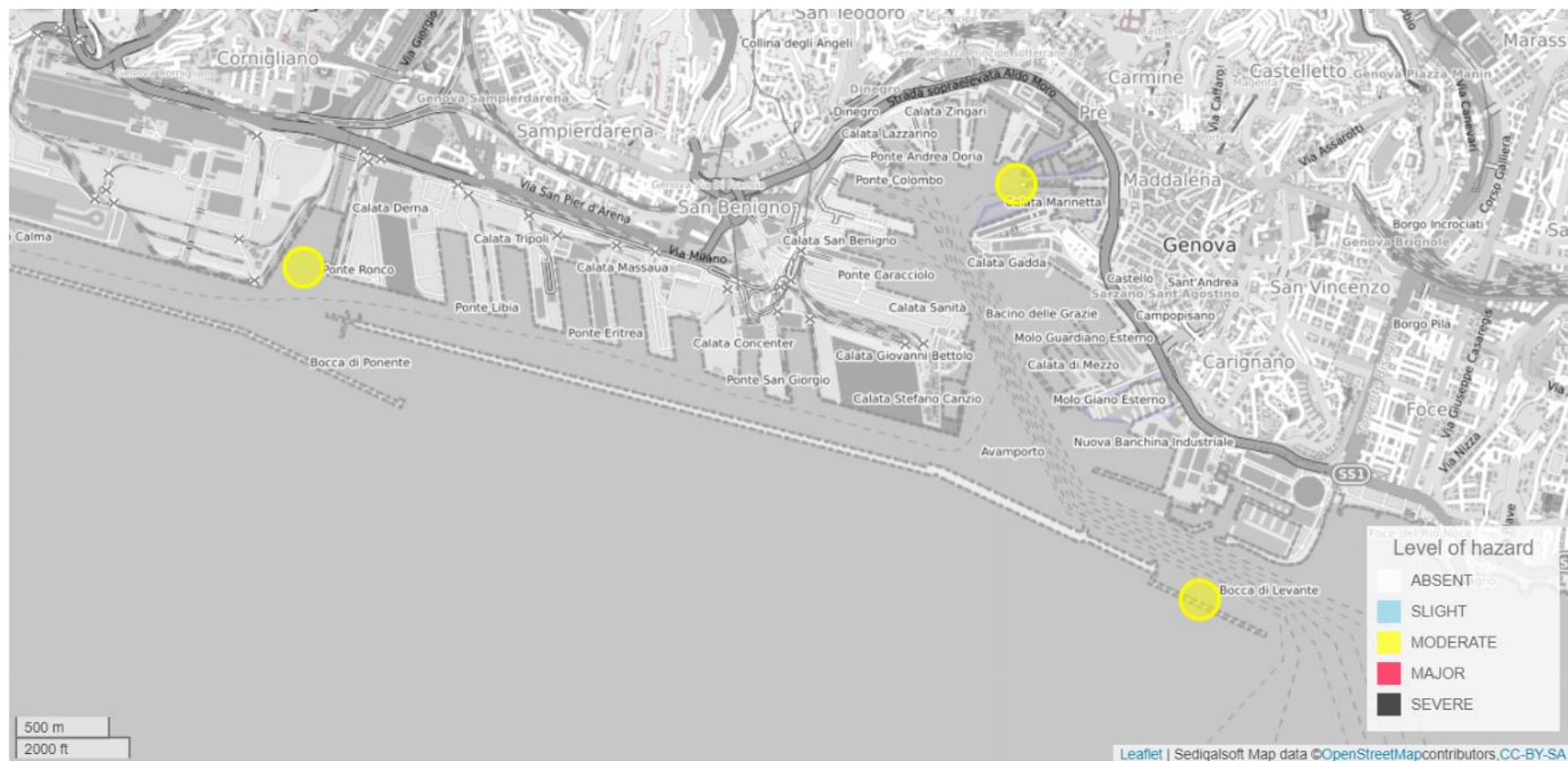


Figura 4.2 Elaborazione complessiva WOE (Output modello SediquaSoft®). Le classi di rischio sono espresse tramite i colori (bianco: assente; celeste: basso; giallo: medio; rosso: alto; nero: molto alto). Campagna II (maggio 2019).

5 – Porto di La Spezia: elaborazione di analisi di rischio ecologico

I dati raccolti nell'area portuale di La Spezia si riferiscono a 5 LOE principali: caratterizzazione chimica dei sedimenti in riferimento ai valori L2 del DM 173/2016 (LOE-1), caratterizzazione chimica della colonna d'acqua in riferimento agli SQA del D. Lgs 172/2015 (LOE-2), biodisponibilità di metalli, composti organici per i mitili trapiantati (LOE-3), effetti subletali misurati tramite batterie di biomarker nei mitili trapiantati (LOE-4), caratteristiche ecotossicologiche dei sedimenti valutate tramite una batteria di saggi biologici (LOE-5) (Tabella 5.1).

Tabella 5.1. Tipologia di dati raccolti nell'area portuale di La Spezia nelle diverse campagne.

	LOE	Analisi	Periodo	Campioni
1	Caratterizzazione chimica dei sedimenti	Granulometria Metalli: Al - As - Cd- Cr _{tot} - Cu- Hg - Ni- Pb- Zn Composti organostannici IPA PCB Idrocarburi aromatici Pesticidi	I Campagna (novembre 2017) II Campagna (maggio 2019) III Campagna (settembre 2019)	- Molo Garibaldi / Molo Fornelli (SE-01) - Cadimare (SE-02) - Centro Rada (SE-03) - Imboccatura di levante (SE-04)
2	Caratterizzazione chimica della Colonna d'acqua	Metalli: Al - As - Cr _{tot} - Cu - Fe - Mn - Ni - Pb - V - Zn Altri par.: Chla - %OD - NO ₃ - PO ₄ - pH - Temp - Cond - Torb	II Campagna (maggio 2019)	da Pt 1 a Pt 15
3	Biodisponibilità <i>Mytilus galloprovincialis</i>	Metalli: As - Cd - Cr _{tot} - Cu - Hg - Ni- Pb - Zn Composti organostannici IPA PCB Idrocarburi aromatici Pesticidi	I Campagna (novembre 2017) II Campagna (maggio 2019) III Campagna (settembre 2019)	- Molo Fornelli (MT-01) - Molo Garibaldi2(MT-01) - Cadimare (MT-03) - Scuola di vela Santa Teresa (MT-04)
4	Biomarkers <i>Mytilus galloprovincialis</i>	Metallotioneine Acetilcolinesterasi Micronuclei LS NRRT % Fagocitosi Rapporto Gran/Ian	II Campagna (maggio 2019) III Campagna (settembre 2019)	- Molo Fornelli (MT-01) - Molo Garibaldi2(MT-01) - Cadimare (MT-03) - Scuola di vela Santa Teresa (MT-04)
5	Saggi ecotossicologici	Embriotossicità - <i>Paracentrotus Lividus</i> Crescita algale - <i>Phaeodactylum tricornutum</i> Biluminescenza - <i>Aliivibrio fischeri</i> in fase solida	I Campagna (novembre 2017) II Campagna (maggio 2019) III Campagna (settembre 2019)	- Molo Garibaldi / Molo Fornelli (SE-01) - Cadimare (SE-02) - Centro Rada (SE-03) - Imboccatura di levante (SE-04)

5.1 – LOE1 Caratterizzazione chimica dei sedimenti

L'area del porto di La Spezia nella prima campagna ha mostrato un livello di pericolo chimico Assente, mentre nelle altre due campagne (II - III) il livello di pericolo chimico elaborato è risultato Medio o Alto, Molto Alto per il campione GR-SP-II-SE-02 (Tabella 5.2).

I composti che hanno fornito il contributo percentualmente superiore all'indice di pericolo chimico nella seconda e terza campagna sono stati i metalli (Zn, Hg e Pb) e la sommatoria dei Policloro-bifenili per il campione SE-02 della terza campagna.

Tabella 5.2 Livelli di pericolo chimico ottenuti dalla elaborazione ponderata dei dati chimici di tutti i sedimenti del porto di La Spezia in riferimento ai limiti L2 (DM 173/2016).

Codice Campione	Area	Campagna	HQ	% max/RTR	N. param sfor.	Livello di pericolo chimico
MF01	Tra Molo Garibaldi e Molo Fornelli	I	0,03	-	0	ASSENTE
MF02	Antistante Cadimare	I	0,03	-	0	ASSENTE
MF03	Centro Rada	I	0,03	-	0	ASSENTE
MF04	Imboccatura di levante	I	0	-	0	ASSENTE
GR-SP-II-SE-01	Tra Molo Garibaldi e Molo Fornelli	II	6,87	64,5 - Zn	3	ALTO
GR-SP-II-SE-02	Antistante Cadimare	II	15,1	24,7 - Hg	6	MOLTO ALTO
GR-SP-II-SE-03	Centro Rada	II	5,22	28,2 - Zn	4	MEDIO
GR-SP-II-SE-04	Imboccatura di levante	II	4,4	7,1 - Pb	3	MEDIO
GR-SP-III-SE-01	Tra Molo Garibaldi e Molo Fornelli	III	7,39	82,8 - Zn	2	ALTO
GR-SP-III-SE-02	Antistante Cadimare	III	10,7	31 - S PCB	5	ALTO
GR-SP-III-SE-03	Centro Rada	III	5,31	28,2 - Zn	4	MEDIO
GR-SP-III-SE-04	Imboccatura di levante	III	5,34	28,3 - Zn	4	MEDIO

5.2 – LOE2 Caratterizzazione chimica colonna d'acqua

Nella Tabella 5.3 sono mostrati i risultati ottenuti dalla caratterizzazione chimica della colonna d'acqua; l'elaborazione ha fornito una classe di pericolo chimico Assente o Basso per quasi tutti i campioni, con l'eccezione del campione MT03 della seconda campagna che presenta un livello di pericolo Medio.

Il calcolo dell'indice TRIX ha mostrato una classe di qualità da "Buono" a "Elevato" per tutti i campioni.

Tabella 5.3. Livelli di pericolo chimico ottenuti dalla elaborazione ponderata dei dati chimici della colonna d'acqua del porto di La Spezia in riferimento ai limiti SQA (D.Lgs. 172/2015).

Codice Campione	Campagna	SQA (D.Lgs.172/15)				TRIX	CLASSE TRIX
		HQ	% max/RTR	N. param sfor.	Livello di pericolo chimico		
MT01	II	0.75		0	TRASCURABILE		
MT02	II	1.76	100 - Cr	1	BASSO		
MT03	II	3.77	50.6 - Cr	2	MEDIO		
MT04	II	0.58		0	ASSENTE		
Pt 1	II	0.43		0	ASSENTE	2.9	Elevato
Pt 2	II	0.4		0	ASSENTE	2.9	Elevato
Pt 3	II	0.35		0	ASSENTE	3.4	Elevato
Pt 4	II	0.48		0	ASSENTE		
Pt 5	II	0.42		0	ASSENTE	4.1	Buono
Pt 6	II	0.53		0	ASSENTE	4.1	Buono
Pt 7	II	0.45		0	ASSENTE	4	Buono
Pt 8	II	0.45		0	ASSENTE	3.7	Elevato
Pt 9	II	0.32		0	ASSENTE	3.7	Elevato
Pt 10	II	0.28		0	ASSENTE	4	Buono
Pt 11	II	0.32		0	ASSENTE	4.1	Buono
Pt 12	II					3.3	Elevato
Pt 13	II					3.7	Elevato
Pt 14	II					4.5	Buono
Pt 15	II					4.1	Buono

5.3 – LOE3 Biodisponibilità

L'elaborazione complessiva dei risultati tramite i criteri di integrazione ponderata ha evidenziato spesso un livello di bioaccumulo Assente o Basso nei tessuti dei mitili del porto di La Spezia: fanno eccezione i campioni GR-SP-II-MT-02, GR-SP-PL-II-MT-06 e GR-SP-III-MT-03 con un livello di pericolo di bioaccumulo Medio, e i campioni MT01, MT02, MT03 della prima campagna e il sito "Molo Garibaldi della terza campagna con un livello "Alto" (Tabella 5.4).

Tabella 5.4. Risultati della elaborazione complessiva del pericolo di bioaccumulo nei tessuti di mitili del porto di La Spezia.

Codice Campione	Sito	Campagna	Numero parametri assegnati alle diverse classi					HQ	Livello di pericolo
			Assente	Basso	Medio	Alto	Molto Alto		
GR-SP-I-MT-01	Molo Fornelli	I	16	5	16	6	0	124.81	ALTO
GR-SP-I-MT-02	Molo Garibaldi	I	16	8	12	6	1	122.44	ALTO
GR-SP-I-MT-03	Cadimare molo aeronautica militare	I	13	8	14	7	1	132.83	ALTO
GR-SP-PL-I-MT-05	Diga ponente interna	I	24	17	2	0	0	7.83	BASSO
GR-SP-PL-I-MT-06	Diga levante interna	I	27	15	1	0	0	5.09	BASSO
GR-SP-PL-I-MT-07	Diga levante esterna	I	43	0	0	0	0	0	ASSENTE
GR-SP-II-MT-01	Molo Fornelli	II	40	3	0	0	0	1.56	BASSO
GR-SP-II-MT-02	Molo Garibaldi	II	32	4	7	0	0	26.65	MEDIO
GR-SP-II-MT-03	Cadimare molo aeronautica militare	II	40	3	0	0	0	1.7	BASSO
GR-SP-II-MT-04	Scuola di vela Santa Teresa	II	43	0	0	0	0	0	ASSENTE
GR-SP-PL-II-MT-05	Diga ponente interna	II	24	17	2	0	0	7.68	BASSO
GR-SP-PL-II-MT-06	Diga levante interna	II	26	11	6	0	0	20.2	MEDIO
GR-SP-PL-II-MT-07	Diga levante esterna	II	43	0	0	0	0	0	ASSENTE
GR-SP-III-MT-02	Molo Garibaldi	III	20	13	1	3	6	170.95	ALTO
GR-SP-III-MT-03	Cadimare molo aeronautica militare	III	18	8	14	3	0	88.33	MEDIO
GR-SP-III-MT-04	Scuola di vela Santa Teresa	III	43	0	0	0	0	0	ASSENTE
GR-SP-PL-III-MT-05	Diga ponente interna	III	27	13	3	0	0	10.57	BASSO
GR-SP-PL-III-MT-06	Diga levante interna	III	27	13	3	0	0	10.7	BASSO
GR-SP-PL-III-MT-07	Diga levante esterna	III	43	0	0	0	0	0	ASSENTE

5.4 – LOE4 Biomarker

I risultati dei biomarker ottenuti per i mitili traslocati nel porto di La Spezia sono rappresentati nella Tabella 5.5; che evidenzia un livello di pericolo elaborato Assente o Basso per tutti i campioni.

Tabella 5.5. Risultati della elaborazione complessiva del pericolo relativo ai biomarker nei mitili del porto di La Spezia.

Codice Campione	Sito	Campagna	Numero biomarker assegnati alle diverse classi					Livello di pericolo
			Assente	Basso	Medio	Alto	Molto Alto	
GR-SP-II-MT-01	Molo Fornelli	II	6	0	0	0	0	ASSENTE
GR-SP-II-MT-02	Molo Garibaldi	II	5	0	1	0	0	BASSO
GR-SP-II-MT-03	Cadimare molo aeronautica militare	II	6	0	0	0	0	ASSENTE
GR-SP-II-MT-04	Scuola di vela Santa Teresa	II	6	0	0	0	0	ASSENTE
GR-SP-III-MT-02	Molo Garibaldi	III	4	0	1	0	0	BASSO
GR-SP-III-MT-03	Cadimare molo aeronautica militare	III	4	0	1	0	0	BASSO
GR-SP-III-MT-04	Scuola di vela Santa Teresa	III	5	0	0	0	0	ASSENTE

5.5 – LOE5 Saggi ecotossicologici

La Tabella 5.6 mostra i risultati complessivi della elaborazione della batteria dei saggi ecotossicologici effettuati sui sedimenti. In questo studio, la batteria utilizzata ha previsto l'analisi della bioluminescenza nel batterio *Aliivibrio fischeri* esposto alla fase solida, la crescita algale di *Phaeodactylum tricornutum*, l'embriotossicità nel *Paracentrotus lividus*.

La classe di pericolo ecotossicologico elaborata per i campioni di sedimento è risultata Assente o Bassa, ad eccezione del campione GR-SP-II-SE-01 con un livello Molto Alto, e dei campioni della terza campagna GR-SP-III-SE-01 e GR-SP-III-SE-04 che presentano rispettivamente un livello di pericolo ecotossicologico Medio e Alto.

Tabella 5.6 Risultati della elaborazione complessiva del pericolo ecotossicologico per il porto di La Spezia mediante criteri di integrazione ponderata sulle batterie di saggi costituite da *Paracentrotus Lividus*, *Aliivibrio fischeri* e *Phaeodactylum tricornutum*.

Codice Campione	Sito	Campagna	Specie	HQ Specifico	HQ Batteria	Livello di pericolo
GR-SP-II-SE-01	Tra Molo garibaldi e Molo Fornelli	II	<i>P. lividus</i>	6.21	9	MOLTO ALTO
			<i>P. tricornutum</i>	9.32		
			<i>A. fischeri</i>	4.64		
GR-SP-II-SE-02	Antistante Cadimare	II	<i>P. lividus</i>	0.43	0.78	ASSENTE
			<i>P. tricornutum</i>	1.29		
			<i>A. fischeri</i>	0.92		
GR-SP-II-SE-03	Centro Rada	II	<i>P. lividus</i>	0.63	0.87	ASSENTE
			<i>P. tricornutum</i>	1.29		
			<i>A. fischeri</i>	1.03		
GR-SP-II-SE-04	Imboccatura di levante	II	<i>P. lividus</i>	0.79	0.61	ASSENTE
			<i>P. tricornutum</i>	1.29		
			<i>A. fischeri</i>	0		
GR-SP-III-SE-01	Tra Molo garibaldi e Molo Fornelli	III	<i>P. lividus</i>	1.52	2.74	MEDIO
			<i>P. tricornutum</i>	1.29		
			<i>A. fischeri</i>	4.24		
GR-SP-III-SE-02	Antistante Cadimare	III	<i>P. lividus</i>	0.02	1.17	BASSO
			<i>P. tricornutum</i>	1.29		
			<i>A. fischeri</i>	2.45		
GR-SP-III-SE-03	Centro Rada	III	<i>P. lividus</i>	1.04	1.25	BASSO
			<i>P. tricornutum</i>	1.29		
			<i>A. fischeri</i>	1.6		
GR-SP-III-SE-04	Imboccatura di levante	III	<i>P. lividus</i>	6.21	3.69	ALTO
			<i>P. tricornutum</i>	1.29		
			<i>A. fischeri</i>	1.54		

5.6 – Elaborazioni ed analisi di rischio ecologico Weight Of Evidence (WOE)

Nella Tabella 5.7 viene riportato, per ciascuna sito, sia l'indice di pericolo già elaborato e discusso per ciascuna LOE, che l'indice di rischio integrato WOE. L'indice di rischio WOE risulta Assente o Basso per i siti delle prime due campagne, ad eccezione del sito "Molo Fornelli" che ha evidenziato una classe di rischio Medio.

Prodotto n. T2.1.2

Per quanto riguarda la terza campagna, il sito Imboccatura di levante ricade nella classe di rischio Basso, il sito “Molo Fornelli” presenta una classe di rischio Alto, e i siti “Cadimare molo aeronautica” militare e “Centro Rada” una classe di rischio Medio (Figure 5.1 - 5.2 - 5.3).

Prodotto n. T2.1.2

Tabella 5.7 Riassunto dei risultati relativi alle singole elaborazioni ponderate (LOE1, LOE2, LOE3, LOE4 e LOE5) ed integrazione complessiva WOE (Weight of Evidence).

Sito	Campagna	LIVELLO DI PERICOLO					WOE	
		chimico sedimenti LOE 1	chimico colonna d'acqua LOE 2	bioaccumulo LOE 3	biomarker LOE 4	saggi ecotossicologici LOE 5		
Molo Fornelli	I (novembre 2017)	ASSENTE		ALTO		ASSENTE	BASSO	
Cadimare molo aeronautica militare		ASSENTE		ALTO		ASSENTE	BASSO	
Centro Rada		ASSENTE				ASSENTE	ASSENTE	
Imboccatura di levante		ASSENTE				ASSENTE	ASSENTE	
Molo Fornelli	II (maggio 2019)	ALTO	ASSENTE	BASSO	ASSENTE	MOLTO ALTO	MEDIO	
Cadimare molo aeronautica militare		MOLTO ALTO	BASSO	BASSO	BASSO	ASSENTE	BASSO	
Centro Rada		MEDIO	ASSENTE		ASSENTE	ASSENTE	BASSO	

Prodotto n. T2.1.2

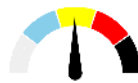
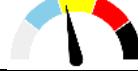
Sito	Campagna	LIVELLO DI PERICOLO					WOE	
		chimico sedimenti LOE 1	chimico colonna d'acqua LOE 2	bioaccumulo LOE 3	biomarker LOE 4	saggi ecotossicologici LOE 5		
Imboccatura di levante		MEDIO	ASSENTE	ASSENTE	ASSENTE	ASSENTE	BASSO	
Molo Fornelli	III (settembre 2019)	ALTO		ALTO		MEDIO	ALTO	
Cadimare molo aeronautica militare	III (settembre 2019)	ALTO		MEDIO	BASSO	BASSO	MEDIO	
Centro Rada		MEDIO			BASSO	BASSO	MEDIO	
Imboccatura di levante		MEDIO		ASSENTE	ASSENTE	ALTO	BASSO	



Figura 5.1 Elaborazione complessiva WOE (Output modello Sediqualsoft®). Le classi di rischio sono espresse tramite i colori (bianco: assente; celeste: basso; giallo: medio; rosso: alto; nero: molto alto). Campagna I (novembre 2017).



Figura 5.2 Elaborazione complessiva WOE (Output modello Sediqualsoft®). Le classi di rischio sono espresse tramite i colori (bianco: assente; celeste: basso; giallo: medio; rosso: alto; nero: molto alto). Campagna II (maggio 2019).



Figura 5.3 Elaborazione complessiva WOE (Output modello Sediqualsoft®). Le classi di rischio sono espresse tramite i colori (bianco: assente; celeste: basso; giallo: medio; rosso: alto; nero: molto alto). Campagna III (settembre 2019).

6 – Porto di Tolone: elaborazione di analisi di rischio ecologico

I dati raccolti nell'area portuale di Tolone si riferiscono a 3 LOE principali: caratterizzazione chimica dei sedimenti in riferimento ai valori L2 del DM 173/2016 (LOE-1), caratterizzazione chimica della colonna d'acqua in riferimento agli SQA del D. Lgs 172/2015 (LOE-2), caratteristiche ecotossicologiche dei sedimenti valutate tramite una batteria di saggi biologici (LOE-5) (Tabella 6.1).

Tabella 6.1. Tipologia di dati raccolti nell'area portuale di Tolone nelle diverse campagne.

	LOE	Analisi	Periodo	Campioni
1	Caratterizzazione chimica dei sedimenti	Granulometria Metalli: Al - As - Cd- Cr _{tot} - Cu- Fe- Hg - Ni- Pb- Zn Composti organostannici IPA PCB Idrocarburi aromatici Pesticidi	I Campagna (febbraio 2019) II Campagna (ottobre 2019)	Banchina Corsica Ferries (SE-01) La Tour Royale (SE-02) Impianti di mitilicoltura (Lazaret) (SE-03)
2	Caratterizzazione chimica della Colonna d'acqua	Metalli: Al - As - Cr _{tot} - Cu - Fe - Mn - Ni - Pb - V - Zn Altri par.: Chla - %OD - NO ₃ - PO ₄ - pH - Temp - Cond - Torb	I Campagna (febbraio 2019)	da Pt 1 a Pt 18
5	Saggi ecotossicologici	Saggio biologico con <i>Paracentrotus Lividus</i> Saggio biologico con <i>Phaeodactylum tricornutum</i> Saggio biologico con <i>Aliivibrio fischeri</i> in fase solida	I Campagna (febbraio 2019) II Campagna (ottobre 2019)	Banchina Corsica Ferries (SE-01) La Tour Royale (SE-02) Impianti di mitilicoltura (Lazaret) (SE-03)

6.1 – LOE1 Caratterizzazione chimica dei sedimenti

Come riportato nella Tabella 6.2, l'elaborazione complessiva di tutti i risultati nei confronti di L2 (DM 173/2016) nella prima campagna ha fornito una classe di pericolo chimico Assente/Trascurabile per i campioni GR-TL-I-SE-02 e GR-TL-I-SE-03 e Molto Alto per il campione GR-TL-I-SE-01. Nella seconda campagna il campione GR-TL-I-SE-01 è risultato sempre in una classe di pericolo chimico Molto Alto e i campioni GR-TL-I-SE-02 e GR-TL-I-SE-03 sono passati da un livello di pericolo chimico Assente/trascurabile ad un livello Medio.

I composti che hanno fornito il contributo percentualmente superiore all'indice di pericolo chimico nella seconda e terza campagna sono stati il Hg e la sommatoria dei Policloro-bifenili.

Tabella 6.2. Livelli di pericolo chimico ottenuti dalla elaborazione ponderata dei dati chimici di tutti i sedimenti del porto di Tolone in riferimento ai limiti L2 (DM 173/2016).

Codice Campione	Area	Campagna	HQ	% max/RTR	N. param sfor.	Livello di pericolo chimico
GR-TL-I-SE-01	Banchina Corsica Ferries	I	38,4	41,7 - Hg	6	MOLTO ALTO
GR-TL-I-SE-02	La Tour Royale	I	0,13	-	0	ASSENTE
GR-TL-I-SE-03	Impianti di mitilicoltura (Lazaret)	I	1,25	100 - As	1	TRASCURABILE
GR-TL-II-SE-01	Banchina Corsica Ferries	II	28,8	49,1 - Hg	5	MOLTO ALTO
GR-TL-II-SE-02	La Tour Royale	II	3,78	62,4 - Hg	2	MEDIO
GR-TL-II-SE-03	Impianti di mitilicoltura (Lazaret)	II	6,08	100 - S PCB	1	MEDIO

6.2 – LOE2 Caratterizzazione chimica colonna d'acqua

Nella Tabella 6.3 sono mostrati i risultati ottenuti dalla caratterizzazione chimica della colonna d'acqua; l'elaborazione ha fornito una classe di pericolo chimico Assente o Basso per tutti i campioni.

La classificazione di qualità ottenuta dall'indice TRIX ha mostrato una classe di qualità dello stato trofico da "Buono" a "Elevato" per tutti i campioni.

Tabella 6.3. Livelli di pericolo chimico ottenuti dalla elaborazione ponderata dei dati chimici della colonna d'acqua del porto di Tolone in riferimento ai limiti SQA (D.Lgs. 172/2015).

Codice Campione	Campagna	SQA (D.Lgs.172/15)				TRIX	CLASSE TRIX
		HQ	% max/RTR	N. param sfor.	Livello di pericolo chimico		
Pt 1	I	0.33		0	ASSENTE	3.4	Elevato
Pt 2	I	0.28		0	ASSENTE	2.2	Elevato
Pt 3	I	0.29		0	ASSENTE	-	Elevato
Pt 4	I	0.28		0	ASSENTE	-	Elevato
Pt 5	I	0.33		0	ASSENTE		
Pt 6	I	0.27		0	ASSENTE	2.6	Elevato
Pt 7	I	0.30		0	ASSENTE	-	Elevato
Pt 8	I	0		0	ASSENTE	-	Elevato
Pt 9	I	1.75	100 - Cr	1	BASSO	3.4	Elevato
Pt 10	I	0.40		0	ASSENTE	2.8	Elevato
Pt 11	I	0.41		0	ASSENTE	3	Elevato
Pt 12	I	0.39		0	ASSENTE	3.6	Elevato
Pt 13	I			0	ASSENTE	3.7	Elevato
Pt 14	I	0		0	ASSENTE	3.8	Elevato
Pt 15	I	2.18	100 - Cr	1	BASSO	3.9	Elevato
Pt 16	I	0.43		0	ASSENTE	4	Buono
Pt 17	I	0.56		0	ASSENTE	4.1	Buono
Pt 18	I	0.59		0	ASSENTE	5.2	Medio

6.3 – LOE5 Saggi ecotossicologici

La Tabella 6.4 mostra i risultati complessivi della elaborazione della batteria dei saggi ecotossicologici effettuati sui sedimenti che ha previsto l'analisi della bioluminescenza nel batterio *Aliivibrio fischeri* esposto alla fase solida, la crescita algale di *Phaeodactylum tricornutum*, l'embriotossicità nel *Paracentrotus lividus*.

La classe di pericolo ecotossicologico elaborata per tutti i campioni di sedimento della prima e della seconda campagna è risultata Assente.

Tabella 6.4 Risultati della elaborazione complessiva del pericolo ecotossicologico per il porto di Tolone mediante criteri di integrazione ponderata sulle batterie di saggi costituite da *Paracentrotus Lividus*, *Aliivibrio fischeri* e *Phaeodactylum tricornutum*.

Codice Campione	Sito	Campagna	Specie	HQ Specifico	HQ Batteria	Livello di pericolo
GR-TL-I-SE-01	Banchina Corsica Ferries	I	<i>P. lividus</i>	2.49	0.73	ASSENTE
			<i>P. tricornutum</i>	0		
			<i>A. fischeri</i>	0		
GR-TL-I-SE-02	La Tour Royale	I	<i>P. lividus</i>	0.58	0.21	ASSENTE
			<i>P. tricornutum</i>	0.14		
			<i>A. fischeri</i>	0		
GR-TL-I-SE-03	Impianti di mitilicoltura (Lazaret)	I	<i>P. lividus</i>	1	0.29	ASSENTE
			<i>P. tricornutum</i>	0		
			<i>A. fischeri</i>	0		
GR-TL-II-SE-01	Banchina Corsica Ferries	II	<i>P. lividus</i>	0.92	0.65	ASSENTE
			<i>P. tricornutum</i>	1.29		
			<i>A. fischeri</i>	0		
GR-TL-II-SE-02	La Tour Royale	II	<i>P. lividus</i>	0.87	0.63	ASSENTE
			<i>P. tricornutum</i>	1.29		
			<i>A. fischeri</i>	0		
GR-TL-II-SE-03	Impianti di mitilicoltura (Lazaret)	II	<i>P. lividus</i>	0.58	0.64	ASSENTE
			<i>P. tricornutum</i>	1.29		
			<i>A. fischeri</i>	0.32		

6.4 – Elaborazioni ed analisi di rischio ecologico Weight Of Evidence (WOE)

Nella Tabella 6.5 viene riportato, per ciascuna sito, sia l'indice di pericolo già elaborato e discusso per ciascuna LOE, che l'indice di rischio integrato WOE. L'indice di rischio WOE risulta Assente o Basso per il porto di Tolone ad eccezione di due siti della terza campagna ("Banchina Corsica Ferries" e "Impianti di mitilicoltura Lazaret") che presentano una classe di rischio Medio. (Figure 6.1 - 6.2).

Prodotto n. T2.1.2

Tabella 6.5 Riassunto dei risultati relativi alle singole elaborazioni ponderate (LOE1, LOE2, LOE3, LOE4 e LOE5) ed integrazione complessiva WOE (Weight of Evidence).

Sito	Campagna	LIVELLO DI PERICOLO			WOE	
		chimico sedimenti LOE 1	chimico colonna d'acqua LOE 2	saggi ecotossicologici LOE 5		
Banchina Corsica Ferries	I (febbraio 2019)	MOLTO ALTO	ASSENTE	ASSENTE	BASSO	
La Tour Royale		ASSENTE	ASSENTE	ASSENTE	ASSENTE	
Impianti di mitilicoltura (Lazaret)		TRASCURABILE	ASSENTE	ASSENTE	ASSENTE	
Banchina Corsica Ferries	II (ottobre 2019)	MOLTO ALTO		ASSENTE	MEDIO	
La Tour Royale		MEDIO		ASSENTE	BASSO	
Impianti di mitilicoltura (Lazaret)		MEDIO		ASSENTE	MEDIO	



Figura 6.1 Elaborazione complessiva WOE (Output modello Sediqualsoft®). Le classi di rischio sono espresse tramite i colori (bianco: assente; celeste: basso; giallo: medio; rosso: alto; nero: molto alto). Campagna I (febbraio 2019).



Figura 6.2 Elaborazione complessiva WOE (Output modello Sediqualsoft®). Le classi di rischio sono espresse tramite i colori (bianco: assente; celeste: basso; giallo: medio; rosso: alto; nero: molto alto). Campagna II (ottobre 2019).

7 – Indici integrati specifici per i porti coinvolti nel progetto

I risultati ottenuti confermano l'importanza dell'approccio multidisciplinare nel monitoraggio e nella valutazione della pericolosità dovuta ai contaminanti in ambienti complessi, caratterizzati da un'elevata eterogeneità delle condizioni ambientali come i siti portuali; tale approccio è in grado di fornire importanti informazioni sugli effetti dei contaminanti chimici sul biota e la loro capacità di trasferimento trofico, risultando così uno strumento fondamentale nella procedura di valutazione del rischio ecologico. In questo progetto, l'utilizzo del modello di integrazione ponderata ha permesso di valutare attraverso diverse linee di evidenza un singolo giudizio complessivo di rischio ambientale, legato per esempio alla mobilizzazione dei sedimenti portuali, di facile utilizzo per la gestione delle aree portuali, evidenziando come le attività che insistono su queste aree possono essere diverse tra loro e portare ad avere diversi gradi di rischio ambientale.

Tale integrazione è stata effettuata per tutte le campagne in modo da riuscire a valutare ed evidenziare l'andamento delle condizioni di pericolosità ambientale nel tempo.

Il modello ha permesso di ottenere una classe di rischio ecologico integrando una grande quantità di dati eterogenei disponibili nei diversi porti, rispettivamente:

- circa 4200 risultati per il porto di Olbia;
- circa 3600 risultati per il porto di Genova;
- circa 2300 risultati per il porto di La Spezia;
- circa 700 risultati per il porto di Tolone;

Per quanto riguarda la prima campagna, tutti i siti di indagine dei vari porti hanno evidenziato una condizione di rischio ecologico Assente o Basso.

Prodotto n. T2.1.2

Nella seconda campagna, le condizioni ambientali dei porti mostrano generalmente un passaggio di classe: il porto di Olbia passa da una condizione di assenza di rischio ad una classe di rischio Basso; il porto di Genova da una classe di rischio Basso ad una classe di rischio Medio; il porto di La Spezia mostra una situazione simile rispetto alla campagna precedente con una classe di rischio Basso, ad eccezione del sito “Molo Fornelli” che evidenzia una classe di rischio Medio; anche il porto di Tolone passa da una condizione ambientale con un rischio Assente/Basso a Basso/Medio. (Tabella 7.1).

Tabella 7.1 Classe di rischio ecologico dei porti di Olbia, Genova, La Spezia e Tolone nelle 3 campagne. Le classi di rischio sono espresse tramite i colori (bianco: assente; celeste: basso; giallo: medio; rosso: alto; nero: molto alto).

Porto	Sito	Classe di rischio Ecologico		
		I Campagna	II Campagna	III Campagna
Olbia	Banchina Isola Bianca	ASSENTE	BASSO	BASSO
	Foce Padrongianus	ASSENTE	BASSO	BASSO
	Area esterna	ASSENTE	ASSENTE	BASSO
Genova	Diga foranea imboccatura levante	ASSENTE	MEDIO	
	Porto antico	BASSO	MEDIO	
	Foce Polcevera	BASSO	MEDIO	
La Spezia	Molo Fornelli	BASSO	MEDIO	ALTO
	Cadimare molo aeronautica militare	BASSO	BASSO	MEDIO
	Centro Rada	ASSENTE	BASSO	MEDIO
	Imboccatura di levante	ASSENTE	BASSO	BASSO
Tolone	Banchina Corsica Ferries	BASSO	MEDIO	
	La Tour Royale	ASSENTE	BASSO	
	Impianti di mitilicoltura (Lazaret)	ASSENTE	MEDIO	

In generale, questo peggioramento della classe di rischio è prevalentemente dovuto alle seguenti LOEs:

Prodotto n. T2.1.2

- **Porto di Olbia:** il peggioramento di rischio da Assente a Basso che si osserva tra la prima (giugno 2018) e la seconda campagna (maggio 2019) è dovuto sia ad un numero maggiore di LOEs investigate sia ad un aumento del livello di pericolo ecotossicologico (LOE5) nella II campagna. Il contributo maggiore della classe di rischio Basso per la III campagna (novembre 2019) è dato dal livello di pericolo chimico Medio della colonna d'acqua (LOE2);

- **Porto di Genova:** la classe di rischio Medio che si osserva nella seconda campagna (maggio 2019) è dovuto generalmente ad aumento del livello di pericolo della LOE 3, LOE 4 e LOE 5;

- **Porto di La Spezia:** l'aumento della classe di pericolo che si osserva nel tempo è dovuto principalmente ad un aumento del livello di pericolo chimico dei sedimenti (LOE 1) e anche alla LOE dei saggi ecotossicologici (LOE5);

- **Porto di Tolone:** l'aumento della classe di pericolo che si osserva nella II campagna è dovuto principalmente ad un aumento del livello di pericolo chimico dei sedimenti (LOE 1).

8 - Bibliografia

- Bebianno M.J., Pereira C.G., Rey F., Cravo A., Duarte D., D'Errico G., Regoli F. (2015). Integrated approach to assess ecosystem health in harbor areas. *Science of The Total Environment* 514, 92-107.
- Benedetti M., Ciaprini F., Piva F., Onorati F., Fattorini D., Notti A., Ausili A., Regoli F. (2012). A multidisciplinary weight of evidence approach for classifying polluted sediments: Integrating sediment chemistry, bioavailability, biomarkers responses and bioassays. *Environmental International* 38, 17-28.
- Benedetti M., Gorbi S., Fattorini D., d'Errico G., Piva F., Pacitti D., Regoli F. (2014). Environmental hazards from natural hydrocarbons seepage: integrated classification of risk from sediment chemistry, bioavailability and biomarkers responses in sentinel species. *Environmental Pollution* 185, 116-126.
- Borja A., Franco J., Perez V. (2000). A marine biotic index to establish the ecological quality of soft-bottom benthos within European estuarine and coastal environments. *Marine Pollution Bulletin* 40, 1100-1114.
- Chapman P.M., Wang F., Caeiro S.S. (2013). Assessing and managing sediment contamination in transitional waters. *Environment international* 55, 71-91.
- Chapman P.M. (2007). Determining when contamination is pollution – weight of evidence determinations for sediments and effluents. *Environmental International* 33, 492-501.
- Dauvin J.C., Ruellet T. (2007). Polychaete/amphipod ratio revisited. *Marine Pollution Bulletin* 55, 215-224.

Decreto Ministeriale 173/2016, 15 luglio 2016. Regolamento recante modalità e criteri tecnici per l'autorizzazione all'immersione in mare dei materiali di escavo di fondali marini.

Decreto Ministeriale 260/2010. Regolamento recante i Criteri tecnici per la classificazione dello stato dei corpi idrici superficiali, per la modifica delle norme tecniche del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152, recante norme in materia ambientale, predisposto ai sensi dell'articolo 75, comma 3, del medesimo decreto legislativo. G.U. 30 del 7 Febbraio 2011.

Frantzen M., Regoli F., Ambrose W. G., Nahrgang J., Geraudie P., Benedetti M., Camus L. (2016). Biological effects of mechanically and chemically dispersed oil on the Icelandic scallop (*Chlamys islandica*). *Ecotoxicology and Environmental Safety* 127, 95-107.

Galloway T.S., Brown R.J., Browne M.A., Dissanayake A., Lowe D., Jones M.B., Depledge M.H. (2004). A multibiomarker approach to environmental assessment. *Environmental Science and Technology* 38, 1723-1731

Hagger J.A., Jones M.B., Leonard D.R., Owen R., Galloway T.S. (2006). Biomarkers and integrated environmental risk assessment: are there more questions than answers? *Integrated Environmental Assessment and Management* 2, 312-329

Lehtonen K., d'Errico G., Korpinen S., Regoli F., Ahkola H., Kinnunen T., Lastumäki T. (2019). Mussel Caging and the Weight of Evidence Approach in the Assessment of Chemical Contamination in Coastal Waters of Finland (Baltic Sea). *Frontiers in Marine Science* 6, 688.

Margalef, R. (1969). Perspectives in Ecological Theory. The University of Chicago Press, Chicago.

- Marigómez I., Garmendia L., Soto M., Orbea A., Izagirre U., Cajaraville, M.P. (2013). Marine ecosystem health status assessment through integrative biomarker indices: a comparative study after the Prestige oil spill "Mussel Watch". *Ecotoxicology* 22(3), 486-505.
- Mestre N.C., Rocha T.L., Canals M., Cardoso C., Danovaro R., Dell'Anno A., Gambi C., Regoli F., Sanchez-Vidal A., Bebianno M.J. (2017). Environmental hazard assessment of a marine mine tailings deposit site and potential implications for deep-sea mining. *Environmental Pollution* 228, 169-178.
- Mistri M., Munari C. (2008). BITS: a SMART indicator for soft-bottom, non-tidal lagoons. *Marine Pollution Bulletin* 56, 587-599
- Moore M.N., Icarus Allen J., McVeigh A. (2006). Environmental prognostics: An integrated model supporting lysosomal stress responses as predictive biomarkers of animal health status. *Marine Environmental Research* 61, 278-304
- Morrone L., d'Errico G., Sacchi M., Molisso F., Armiento G., Chiavarini S., Rimauro J., Guida M., Siciliano A., Ceparano M., Aliberti F., Tosti E., Gallo A., Libralato G., Patti F.P., Gorbi S., Fattorini D., Nardi A., Di Carlo M., Mezzelani M., Benedetti M., Pellegrini D., Musco L., Danovaro R., Dell'Anno A., Regoli F. (2020). Integrated characterization and risk management of marine sediments: The case study of the industrialized Bagnoli area (Naples, Italy). *Marine Environmental Research* 160, 104984.
- Muxika I., Borja A., Bald J. (2007). Using historical data, expert judgement and multivariate analysis in assessing reference conditions and benthic ecological status, according to the European Water Framework Directive. *Marine Pollution Bulletin* 55, 16-29
- Pielou E.C. (1969). *An Introduction to Mathematical Ecology*. Wiley-Interscience, New York.

- Piva F., Ciaprinì F., Onorati F., Benedetti M., Fattorini D., Ausili A., Regoli F. (2011). Assessing sediment hazard through a Weight Of Evidence approach with bioindicator organisms: a practical model to elaborate data from sediment chemistry, bioavailability, biomarkers and ecotoxicological bioassays. *Chemosphere* 83, 475-485
- Regoli F., d'Errico G., Nardi A., Mezzelani, M., Fattorini, D., Benedetti M., Di Carlo M., Pellegrini D., Gorbi S. (2019). Application of a weight of evidence approach for monitoring complex environmental scenarios: The case-study of off-shore platforms. *Frontiers in Marine Science* 6, 377.
- Regoli F., Pellegrini D., Cicero A. M., Nigro M., Benedetti M., Gorbi S., Fattorini D., d'Errico G., Di Carlo M., Nardi A., Gaion A., Scuderi A., Giuliani S., Romanelli G., Berto D., Trabucco D., Gui-di P., Bernardeschi M., Scarcelli V., Frenzilli G. (2014). A multidisciplinary weight of evidence approach for environmental risk assessment at the Costa Concordia wreck: integrative indices from Mussel Watch. *Marine Environmental Research* 96, 92-104.
- Shannon C.E., Weaver W. (1963). The Mathematical Theory of Communication. University of Illinois Press, Urbana, Illinois.
- Simboura N., Zenetos A. (2002). Benthic indicators to use in Ecological Quality classification of Mediterranean soft bottom marine ecosystems, including a new Biotic Index. *Mediterranean Marine Science* 3, 77-111.
- Viarengo A., Lowe D., Bolognesi C., Fabbri E., Koehler A. (2007). The use of biomarkers in biomonitoring: A 2-tier approach assessing the level of pollutant-induced stress syndrome in sentinel organisms. *Comparative Biochemistry & Physiology C* 146, 281-300.

Vincent C., Heinrich H., Edwards A., Nygaard K., Haythornthwaite J. (2002). Guidance on typology, reference conditions and classification systems for transitional and coastal waters, CIS Working Group 2.4(Coast) Common Implementation *Strategy of the Water Framework Directive, European Commission.*