



IL MAR PICCOLO DI TARANTO
APPROFONDIMENTO TECNICO-SCIENTIFICO SULLE INTERAZIONI TRA IL
SISTEMA AMBIENTALE ED I FLUSSI DI CONTAMINANTI DA FONTI PRIMARIE E
SECONDARIE

Elaborazione di un modello concettuale sito-specifico
(CONCEPTUAL SITE MODEL)

RISULTATI DELLE ATTIVITÀ CONDOTTE

Aprile 2014

In attuazione della Convenzione tra Commissario Straordinario per gli interventi di bonifica, ambientalizzazione, riqualificazione di Taranto ed ARPA Puglia del 28 maggio 2013.

Il Mar Piccolo di Taranto: approfondimento tecnico-scientifico sulle interazioni tra il sistema ambientale ed i flussi di contaminanti da fonti primarie e secondarie. Elaborazione di un modello concettuale sito-specifico (*Conceptual Site Model*). Risultati delle attività condotte (Aprile 2014)

RESPONSABILE SCIENTIFICO

Dott. Massimo Blonda

REFERENTI TECNICI

Dott. Domenico Gramegna

Dott. Nicola Ungaro

STAFF TECNICO

Dott. Gaetano Costantino

Ing. Silvia Di Cunsolo

Dott.ssa Mina Lacarbonara

Dott.ssa Roberta Renna

Dott. Giuseppe Trinchera

Documento realizzato con il contributo di:

- **Consorzio Nazionale Interuniversitario per le Scienze del Mare – CONISMA** (Università degli Studi di Bari - Dipartimento di Biologia e Dipartimento Scienze della Terra e Geoambientali; Università degli Studi di Milano – Bicocca - Dipartimento di Scienze dell’Ambiente e del Territorio e di Scienze della Terra)
- **Politecnico di Bari – Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, del Territorio, Edile e di Chimica – DICATECH** (sedi di Bari e di Taranto)
- **CNR – IRSA, Istituto di Ricerca sulle Acque** (sede di Bari)
- **CNR – IAMC, Istituto per l'ambiente marino costiero** (sede di Taranto)
- **CNR – IRPI, Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica** (sede di Bari)

Il presente Report è stato redatto a cura di:

Dott. Nicola Ungaro

Dott. Giuseppe Trinchera



Il Mar Piccolo di Taranto: approfondimento tecnico-scientifico sulle interazioni tra il sistema ambientale ed i flussi di contaminanti da fonti primarie e secondarie. Elaborazione di un modello concettuale sito-specifico (*Conceptual Site Model*). Risultati delle attività condotte (Aprile 2014)

INDICE

1.	INTRODUZIONE	6
2.	QUADRO AMBIENTALE	8
2.1.	Rilievi geofisico e geomorfologico dei fondali (a cura del CONISMA, ULR di Bari e Milano)	8
2.1.1.	Modello batimetrico e morfologico del fondale	8
2.1.2.	Mappatura biocenotica dei fondali	11
2.2.	Modello geo-morfo-stratigrafico	17
2.3.	Reticolo Idrografico Principale (a cura del Politecnico di Bari – DICATECh).....	24
2.4.	Caratterizzazione idrogeologica e corpi idrici sotterranei (a cura del CNR – IRPI sede di Bari)	25
2.4.1.	Complessi e lineamenti idrogeologici.....	25
2.4.2.	La superficie piezometrica della falda idrica profonda	28
2.4.3.	Sorgenti e caratteri chimico-fisici delle acque sotterranee.....	29
2.4.4.	La falda idrica superficiale e le aree a destinazione industriale.....	33
2.4.5.	Gli scarichi idrici nel sottosuolo.....	35
2.5.	Modello di circolazione delle acque del Mar Piccolo (a cura del Politecnico di Bari – DICATECh).....	36
2.5.1.	Elaborazioni statistiche ed integrazione con le misure di campo	36
2.6.	Caratteristiche geotecniche dei sedimenti superficiali del 1° Seno del Mar Piccolo e modello geotecnico di riferimento (a cura del Politecnico di Bari – DICATECh)	45
2.6.1.	Indagini in situ	45
2.6.2.	Attività di sperimentazione geotecnica.....	48
2.6.3.	Risultati delle attività di sperimentazione geotecnica (Composizione, proprietà fisiche e plasticità)	49
2.6.4.	Risultati delle attività di sperimentazione geotecnica (Compressibilità e rigonfiamento)	57
2.6.5.	Scenari stratigrafici di riferimento	60
2.6.6.	Scenari stratigrafici e corrispondenti modelli geotecnici	62
2.7.	Stato di qualità (chimica) dei sedimenti.....	65
3.	FONTI DI CONTAMINAZIONE.....	71
3.1.	Fonti primarie (apporti terrigeni).....	71
3.1.1.	Mappatura delle anomalie termiche per le acque del Mar Piccolo (a cura del CNR IRSA di Bari)	71
3.1.2.	Campionamento integrativo delle acque del 1° Seno del Mar Piccolo (a cura di ARPA Puglia).....	74
3.1.3.	Ulteriori valutazione sulla presenza di metalli e PCB nelle acque (a cura del CNR IAMC di Taranto).....	85
3.1.4.	Attività di sopralluogo in alcune zone del 1° seno (a cura di ARPA Puglia con il supporto dei VVF di Taranto).....	88
	Attività di sopralluogo in località Citrello	97
3.2.	Fonti secondarie (sedimenti)	98
3.2.1.	Ulteriori considerazioni sulla presenza di metalli e PCB nei sedimenti (a cura del CNR IAMC di Taranto).98	
3.2.2.	Effetti della risospensione dei sedimenti sulla disponibilità di contaminanti (a cura del CNR IAMC di Taranto).....	103
3.2.3.	Presenza di metalli e PCB nei sedimenti delle sorgenti subaeree (a cura del CNR IAMC di Taranto).....	106
4.	VIE DI TRASPORTO	108
4.1.	Falda profonda e falda superficiale.....	108
4.2.	Stima dei deflussi idrici/solidi e considerazioni sulla propensione all'erosione del substrato (a cura del Politecnico di Bari)	111
4.2.1.	Stima dei deflussi idrici e delle aree soggette ad allagamento	111
4.2.2.	Processi di erosione potenziale del substrato.....	116
4.3.	Modellazione numerica del trasporto solido dei sedimenti nel Mar Piccolo (a cura del Politecnico di Bari).....	120
5.	BERSAGLI	124
5.1.	Valutazione della biodisponibilità e rilascio dei contaminanti da sedimenti (a cura del CNR IAMC di Taranto)	

5.1.1. Aspetti inerenti la decontaminazione da PCB e metalli nei mitili del Mar Piccolo	129
6. ASPETTI EMERGENTI E SCENARI DI BONIFICA DEI SEDIMENTI CONTAMINATI DALLE AREE CRITICHE E PRIORITARIE DEL 1° SENO DEL MAR PICCOLO	133
6.1. Dragaggio dei fondali	135
6.1.1. Analisi del trasporto solido a seguito di interventi di dragaggio dei sedimenti (a cura del Politecnico di Bari)	139
6.1.2. Integrazione tra la modellazione della circolazione marina e la valutazione della biodisponibilità e rilascio dei contaminanti dai sedimenti	144
6.2. Il Capping.....	148
6.2.1. Modellazione di possibili scenari del fondale e scenari di risposta idromeccanica	152
6.3. Evoluzione (assistita) del sistema ambientale.....	154
7. ANALISI VALUTATIVA DEGLI IMPATTI PER L'ECOSISTEMA ACQUATICO DEL 1° SENO DEL MAR PICCOLO ASSOCIATI AGLI SCENARI DI BONIFICA	156
7.1. Metodologia	158
7.1.1. Esposizione.....	159
7.1.2. Vulnerabilità	162
7.1.3. Rischio	164
7.2. Applicazione al 1° seno del Mar Piccolo.....	165
7.2.1. Esposizione.....	166
7.2.2. Vulnerabilità	169
7.2.3. Rischio	169
7.3. Problematiche emergenti	170
8. SINTESI DEL DOCUMENTO	173

ALLEGATI

Allegato 1.

Mappatura delle anomalie termiche con sensoristica per l'individuazione degli scarichi superficiali e delle polle sorgenti (allo scopo di individuare l'ubicazione di eventuali *hotspot* di contaminazione ancora non conosciuti). Report realizzato dal C.N.R.-I.R.S.A. Istituto di Ricerca sulle Acque, sezione di Bari. Referente Dott. Vito Uricchio.

Allegato 2.

- Individuazione dei punti di immissione di inquinante nel Mar Piccolo connessi alla presenza di una rete idrografica superficiale con elevate caratteristiche di intermittenza;
- Stima dei deflussi idrici/solidi mediante modelli idrologici di ultima generazione;
- Studio della propagazione in alveo, ivi compresa la componente di ruscellamento superficiale fuori alveo, con modelli di calcolo mono e/o bidimensionali da implementare in rapporto alla complessità geomorfologica dell'area investigata e stima dell'erosione idrica superficiale (componente top soil) e del conseguente trasporto di inquinante.

Report realizzati dal Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, del Territorio, Edile e di Chimica-Politecnico di Bari-DICATECh. Referente Prof. Umberto Fratino.

Allegato 3.

- Rilievo con Multi Beam e Sub Bottom Profiler della batimetria di dettaglio e della struttura e dello spessore dello strato dei sedimenti del Mar Piccolo. Report realizzato dal Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e del Territorio e di Scienze della Terra-ULR CoNISMa Università degli Studi di Milano-Bicocca. Referente Prof. Cesare Corselli.
- Mappatura biocenotica del Mar Piccolo di Taranto mediante utilizzo di ROV e telecamere subacquee trainate sul fondo. Report realizzato dal Dipartimento di Biologia-ULR CoNISMa Università degli Studi Aldo Moro. Referente Prof. Angelo Tursi e Dott. Francesco Mastrototaro.
- Costruzione del modello geologico, morfologico e sedimentologico del Mar Piccolo. Valutazione degli effetti di flussi di piena. Ricostruzione dei bacini morfologici. Report realizzato dal Dipartimento Scienze della Terra e Geoambientali-ULR CoNISMa Università degli Studi Aldo Moro. Referente Prof. Giuseppe Mastronuzzi.



Allegato 4.

Conoscenze di geologia tecnica e idrogeologia a supporto della caratterizzazione dei corpi idrici sotterranei. Report realizzato dal C.N.R.-I.R.P.I. Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica, sezione di Bari. Referente Dott. Maurizio Polemio.

Allegato 5.

- Modellazione della circolazione marina e del clima meteomarinico del mar piccolo, considerando le principali forzanti agenti sul sistema. Simulazione della circolazione con i principali afflussi, della diffusione di eventuali inquinanti e del trasporto di eventuali sedimenti;
- Modellazione numerica del trasporto solido sul fondale del mar piccolo per effetto delle correnti – Supplemento alla “Modellazione della circolazione marina e del clima meteomarinico del mar piccolo. Simulazione della circolazione con i principali afflussi, della diffusione di eventuali inquinanti e del trasporto di eventuali sedimenti risospesi”;
- Atto integrativo alla Modellazione della circolazione marina e del clima meteomarinico del Mar Piccolo – Simulazione della circolazione con i principali afflussi, della diffusione di eventuali inquinanti e del trasporto di eventuali sedimenti risospesi.

Report realizzati dal Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, del Territorio, Edile e di Chimica-Politecnico di Bari-DICATECh. Referente Prof. Michele Mossa.

Allegato 6.

Piano di campionamento integrativo della colonna d’acqua per l’individuazione e valutazione di alcuni contaminanti organici (PCB, IPA e diossine e PCB diossina-simili) ed inorganici (metalli). Report realizzato da ARPA Puglia.

Allegato 7.

- Stima dei flussi di PCB in ingresso nel Mar Piccolo anche attraverso la mappatura e l’analisi di acque delle sorgenti sottomarine (Citri) e degli apporti fluviali;
- Valutazione della biodisponibilità e rilascio dei contaminanti da sedimenti del Mar Piccolo di Taranto, anche attraverso esperimenti di risospensione, allo scopo di delineare il destino ambientale, la trasferibilità e la possibilità di bioaccumulo in organismi bioindicatori;
- Studio della decontaminazione da policlorobifenili (PCB) e metalli in mitili prelevati nel Mar Piccolo di Taranto e sottoposti a stabulazione in laboratorio e in aree marine del Mar Grande idonee alla molluschicoltura.

Report realizzati dal C.N.R.-I.A.M.C. Istituto per l’ambiente marino costiero di Taranto. Referente Dott. Nicola Cardellicchio.

Allegato 8.

- Caratterizzazione geotecnica dei sedimenti superficiali del 1° seno del Mar Piccolo di Taranto. Report realizzato dal Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, del Territorio, Edile e di Chimica-Politecnico di Bari-DICATECh. Referente Prof. Antonio Federico.
- Caratterizzazione geotecnica preliminare ed indirizzi di modellazione dei sedimenti del i seno del Mar Piccolo di Taranto. Report realizzato dal Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, del Territorio, Edile e di Chimica-Politecnico di Bari-DICATECh. Referente Prof.ssa Federica Cotecchia.

1. INTRODUZIONE

Il presente documento riporta la sintesi dei risultati delle attività previste dal Programma di Lavoro elaborato da ARPA Puglia e realizzato in attuazione della Convenzione tra il Commissario Straordinario per gli interventi di bonifica, ambientalizzazione e riqualificazione di Taranto e l'Agenzia, sottoscritta in data 28 maggio 2013 (Preso d'atto Deliberazione Del Direttore Generale ARPA n. 257 del 04/06/2013), per lo svolgimento di un "approfondimento tecnico-scientifico sulle interazioni tra il sistema ambientale ed i flussi di contaminanti da fonti primarie e secondarie – Elaborazione di un modello concettuale sito-specifico (Conceptual Site Model)".

L'obiettivo di tale incarico è stato quello di progettare e svolgere una serie di attività integrative di studio ed analisi territoriale (Tabella 1), che completassero il quadro ambientale ed ecologico del Mar Piccolo di Taranto e permettessero una migliore comprensione dell'evoluzione e delle dinamiche della contaminazione riscontrata nel bacino, in modo particolare legata alla presenza conclamata di concentrazioni critiche nei sedimenti di microinquinanti organici (PCB e diossine) ed inorganici (metalli pesanti) nel 1° seno, così da poter progettare gli opportuni interventi di bonifica o messa in sicurezza permanente degli stessi, o in alternativa prevedere un ripristino "naturale" dei siti.

ATTIVITÀ	OBIETTIVO	ENTE/REFERENTE
1	<u>Mappatura delle anomalie termiche</u> con sensoristica per l'individuazione degli scarichi superficiali e delle polle sorgentizie (allo scopo di individuare l'ubicazione di eventuali hotspot di contaminazione ancora non conosciuti)	C.N.R.-I.R.S.A.(Dott. Uricchio)
2	Individuazione dei <u>punti di immissione</u> di inquinante nel Mar Piccolo connessi alla presenza di una <u>rete idrografica superficiale</u> con elevate caratteristiche di intermittenza	DICATECh (Prof. Frattino)
3	<u>Stima dei deflussi idrici/solidi</u> mediante modelli idrologici di ultima generazione	DICATECh (Prof. Frattino)
4	Studio della propagazione in alveo, ivi compresa la componente di <u>ruscellamento superficiale</u> fuori alveo, con modelli di calcolo mono e/o bidimensionali da implementare in rapporto alla complessità geomorfologica dell'area investigata e <u>stima dell'erosione idrica superficiale</u> (componente <i>top soil</i>) e del conseguente trasporto di inquinante	DICATECh (Prof. Frattino)
5	Rilievo con <i>Multi Beam</i> e <i>Sub Bottom Profiler</i> della <u>batimetria di dettaglio</u> , <u>della struttura e dello spessore</u> dello strato dei sedimenti del Mar Piccolo	ULR CONISMA Milano-Bicocca (Prof. Corselli)
6	<u>Mappatura biocenotica</u> del Mar Piccolo di Taranto mediante utilizzo di ROV e telecamere subacquee trainate sul fondo	ULR CONISMA Bari (Prof. Tursi-Dott. Mastronotaro)
7	Costruzione del <u>modello geologico, morfologico e sedimentologico</u> del Mar Piccolo. Valutazione degli effetti di flussi di piena. Ricostruzione dei bacini morfologici	ULR CONISMA (Prof. Mastronuzzi)
8	<u>Raccolta dati</u> stratigrafici, geofisici, idrogeologici e di qualità delle <u>acque sotterranee</u> derivanti da studi pregressi	C.N.R.-I.R.P.I. Bari (Dott. Polemio)
9	<u>Modellazione della circolazione marina</u> e del clima meteomarinario del Mar Piccolo, considerando le principali forzanti agenti sul sistema. Simulazione della circolazione con i principali afflussi, della diffusione di eventuali inquinanti e del trasporto di eventuali sedimenti	DICATECh (Prof. Mossa)
10	Analisi delle <u>concentrazioni di inquinanti</u> (prioritariamente PCB, Diossine e alcuni metalli pesanti) nei <u>punti di afflusso delle acque di origine terrigena</u> nel Mar Piccolo	ARPA Puglia
11	<u>Stima dei flussi in ingresso di PCB</u> nel Mar Piccolo anche attraverso la mappatura e l'analisi di acque delle sorgenti sottomarine (Cetri) e degli apporti fluviali	C.N.R.-I.A.M.C. Taranto (Dott. Cardellicchio)
12	Valutazione della <u>biodisponibilità</u> e rilascio dei contaminanti da sedimenti, anche attraverso esperimenti di risospensione	C.N.R.-I.A.M.C. Taranto (Dott. Cardellicchio)
13	Prelievo di campioni indisturbati e <u>caratterizzazione geotecnica</u> della porzione più superficiale dei sedimenti del Mar Piccolo (I seno)	DICATECh (Prof. Federico)
14	Costruzione del <u>modello geotecnico di sottosuolo</u> del I seno del Mar Piccolo di Taranto	DICATECh (Prof.ssa Cotecchia)
15	Elaborazione di un modello concettuale sito-specifico (<u>Conceptual Site Model-CSM</u>)	ARPA Puglia
16	<u>Valutazione degli impatti ("rischio")</u> associati a ciascun intervento di bonifica	ARPA Puglia

Tabella 1. Tabella riassuntiva delle attività d'indagine realizzate in Mar Piccolo.

Il Programma di lavoro complessivo, organizzato in 14 task operative e 2 task di sintesi (definizione del modello concettuale sito-specifico ed analisi valutativa degli impatti associati alla scelta delle varie ipotesi d'intervento finalizzato alla bonifica o messa in sicurezza permanente dell'area, o in alternativa al ripristino "naturale" dell'area), è stato progettato e coordinato da ARPA Puglia e svolto grazie al prezioso contributo di ordine tecnico-scientifico fornito da parte del Consorzio Nazionale Interuniversitario per le Scienze del

MAre – CONISMA (con le Unità Locali di Ricerca dell'Università di Milano-Bicocca e dell'Università di Bari), del Politecnico di Bari – Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, del Territorio, Edile e di Chimica – DICATECh (coinvolgendo le sedi di Taranto e Bari) e di tre istituti del CNR quali l'IRSA, Istituto di Ricerca sulle Acque (sede di Bari), lo IAMC, Istituto per l'ambiente marino costiero (sede di Taranto) e l'IRPI, Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica (sede di Bari).

Per ciascuna delle 14 task operative è stato prodotto, da ogni gruppo di lavoro coinvolto, un report specifico, allegato alla presente relazione e parte integrante della stessa (Allegati da 1 a 9), che riporta nel dettaglio obiettivi, modalità ed esiti degli approfondimenti condotti, mentre nel presente documento si restituisce esclusivamente una sintesi ragionata dei risultati conseguiti. Tutti i tematismi cartografici eventualmente derivanti dallo svolgimento di ogni attività sono ugualmente allegati come file di lavoro caratteristici e rappresentano il database geografico di riferimento delle attività condotte.

Nel Capitolo 2 sono, pertanto, ripresi e sintetizzati i risultati complessivi che hanno permesso di integrare e delineare il quadro ambientale.

Dai nuovi dati ed informazioni così derivate, integrate con gli aspetti ambientali già conosciuti, è stato possibile delineare un *modello concettuale sito-specifico* che ha evidenziato e, in alcuni casi, stimato la presenza ancora attiva di potenziali fonti di contaminazione (Capitolo 3) di tipo primario, perché legate alla componente terrigena delle acque, e di tipo secondario, collegate, invece, alla presenza dei sedimenti contaminati in alcune aree di fondale del 1° seno. Ha permesso, altresì, di meglio rappresentare le principali vie di trasporto della contaminazione (Capitolo 4), legate sia alle dinamiche di trasporto solido operato dai sedimenti soggetti a movimentazione, sia alla componente superficiale e sotterranea delle acque (falda profonda e falde superficiali) ed alla loro possibile commistione in alcune zone; così come l'innestarsi, sotto particolari condizioni, di processi di bioaccumulo in mitili bivalvi, impiegati come organismi bioindicatori (bersagli) della contaminazione (Capitolo 5).

Lo scenario complessivo che è emerso ha sottolineato ancora di più l'estrema complessità e dinamicità del *sistema-Mar Piccolo*, che va pertanto inteso, più che come un unico ambiente di transizione (così definito in quanto influenzato sia da acque marine che terrigene), come un insieme molteplice e peculiare di sistemi ambientali con elevate capacità di autoregolazione, soggetto a forzanti antropiche. Questo, se da un lato conferma, almeno in linea di principio, le gradi potenzialità di ripresa dal punto di vista sistemico, dall'altro evidenzia come le stesse variabili ambientali siano interconnesse e, in alcuni casi, mutuamente regolate e dove l'intervento o la modifica di una comporta modificazioni a catena sulle altre, non sempre facilmente prevedibili e valutabili. Su questi aspetti si somma, anche, l'importante componente antropica che con la sua *impronta ecologica*, protratta nel tempo, è intervenuta condizionando l'evoluzione e le dinamiche complessive del sistema (ad es. la mitilicoltura).

Pertanto, l'iniziale finalità propria del Programma di lavoro di poter definire il modello concettuale al fine di ipotizzare "i migliori scenari per il ripristino ambientale" (in questo caso propedeutico ad un eventuale intervento di bonifica dei sedimenti contaminati del 1° seno), si è rilevata riduttiva e, per alcuni aspetti, impropria perché non risolutiva della situazione rispetto ad una progettazione integrata e per *step* successivi di intervento. A tal fine è emerso come sia indispensabile considerare ed opportunamente ponderare le implicazioni di ordine sociale, economico e politico conseguenti all'individuazione degli "obiettivi di bonifica" per il bacino del Mar Piccolo, di come gli si intenda perseguire e come qualsiasi intervento non possa sottrarsi ad una attenta analisi in termini di "sostenibilità ambientale".

A supporto delle decisioni si è quindi optato per un'analisi delle tre ipotesi di intervento potenzialmente perseguibili e rappresentate dal "dragaggio", dal "capping" e dalla così detta "valutazione dell'evoluzione (assistita) del sistema ambientale" (Capitolo 6), accompagnando ciascuna da un'analisi valutativa dell'impatto ambientale (inteso come potenziale rischio) evidenziando così i pro e i contro della loro realizzazione (Capitolo 7).

2. QUADRO AMBIENTALE

2.1. RILIEVI GEOFISICO E GEOMORFOLOGICO DEI FONDALI (A CURA DEL CONISMA, ULR DI BARI E MILANO)

2.1.1. Modello batimetrico e morfologico del fondale

Complessivamente le attività svolte hanno comportato l'acquisizione di dati geofisici da remoto nel periodo fra l'11 luglio 2013 e il 18 luglio 2013, l'elaborazione dei dati acquisiti tramite opportuni software, l'interpretazione degli stessi dati elaborati e la restituzione dei risultati.

Per quanto riguarda l'acquisizione dei dati geofisici, è stata impiegata un'imbarcazione di proprietà del CONISMA, ritenuta idonea per operare all'interno del Mar Piccolo, sulla quale sono state imbarcate le attrezzature e la strumentazione idonea per le finalità dei rilievi: un sistema *multi beam* ad alta risoluzione per bassi fondali (RESON® Seabat 8125), che ha permesso di restituire con accuratezza decimetrica informazioni in merito alla morfometria dell'area investigata e alla natura dei materiali presenti; un *side scan sonar* (Klein 3000) per il rilievo morfologico operante in bassa frequenza 132kHz e range 100 m; un sistema *sub bottom profiler* (Innomar 2000) per l'esecuzione del rilievo sismico ad alta risoluzione con frequenze di 10-12-15 kHz.

Tutti i dati sono stati acquisiti utilizzando un sistema di posizionamento GPS (dGPS Hemisphere Crescent R100) e il software di navigazione PDS2000® integrato con un sistema di girobussola e sensore di moto OCTANS-IXEA. Inoltre la calibrazione relativa alla velocità del suono è stata ottenuta tramite il profilatore SeaBird.

In fase operativa di campo sono state riscontrate diverse problematiche legate alla presenza di ostacoli di varia natura che hanno reso difficoltosa e macchinosa l'esecuzione dei rilievi. In particolare ci si è dovuti rapportare alla presenza di filari di boe per l'allevamento dei mitili con orientamento variabile, vecchi allevamenti caratterizzati da pali singoli talora visibili e talora a pelo d'acqua, vecchie griglie soffolte; cime trasversali; reti da pesca con posizione sconosciuta e non prevedibile; presenza di aree militari; presenza di corpi morti sul fondo.

In Figura 1 è riportato il modello digitale del fondale (*Digital Terrain Model*) ottenuto tramite l'elaborazione dei dati acquisiti durante i rilievi multibeam. In considerazione della batimetria ridotta del fondale e del fatto che l'ampiezza del fondo investigato è funzione della profondità cui il rilievo è eseguito, per poter ottenere la completa copertura del fondale sarebbe stato necessario eseguire delle traiettorie molto fitte di acquisizione. A causa dei problemi legati alla navigazione in aree utilizzate per l'allevamento dei mitili e ad altre attività antropiche, la copertura acquisita è stata solo parziale. Le anomalie batimetriche (aree in blu), rispetto ad una profondità naturale dei due seni, sono essenzialmente legate a fenomeni naturali (citri) e ad attività antropica (scavi di diversa natura). È stato, comunque, possibile evidenziare anche la presenza e l'impatto di attività antropiche quali le strutture utilizzate per l'allevamento dei mitili e le tracce lasciate dalle ancore sui fondali.

Il side scan sonar, a differenza del multibeam consente di poter stabilire l'ampiezza del fondo investigato dal segnale. Il range utilizzato (100 m) ha permesso in questo modo di poter ottenere dei sonogrammi che coprivano circa 200 metri lateralmente (destra e sinistra) della rotta seguita dall'imbarcazione. In Figura 2 sono indicate le interpretazioni morfologiche dei rilievi.

La sismica ad alta risoluzione permette di rilevare la stratigrafia e le geometrie delle diverse litologie che formano il substrato. I profili *sub bottom profiler* hanno così permesso di ottenere una carta dello spessore (isopache) dei sedimenti superficiali che caratterizzano i bacini. A supporto dell'interpretazione e calibrazione dei profili è stata utilizzata l'unica stratigrafia di sondaggi disponibili relativa ad una serie di sondaggi effettuati in prossimità dei Cantieri Tosi (nord-est del Primo Seno) desunti da un lavoro di Parenzan del 1975. Si ritiene che i sedimenti attribuibili a tale spessore siano quelli legati all'ultima trasgressione marina iniziata al termine dell'ultimo periodo glaciale, depositati nell'intervallo compreso fra 18.000/16.000 anni e i giorni nostri.

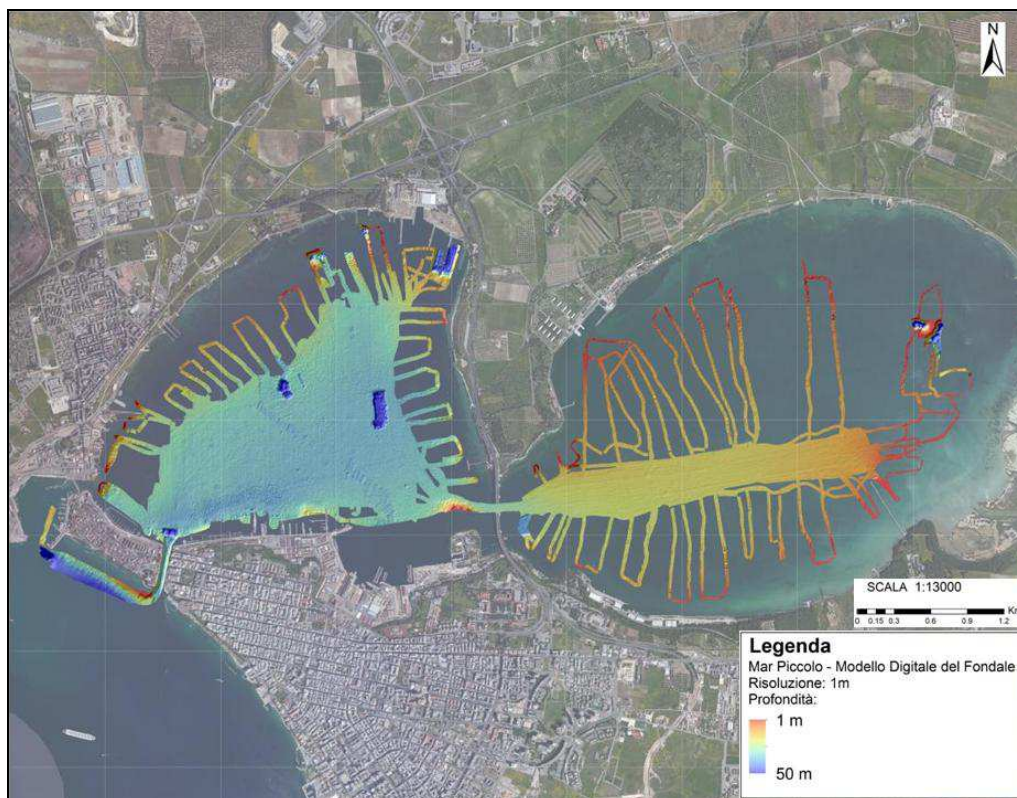


Figura 1. Rilievo batimetrico.

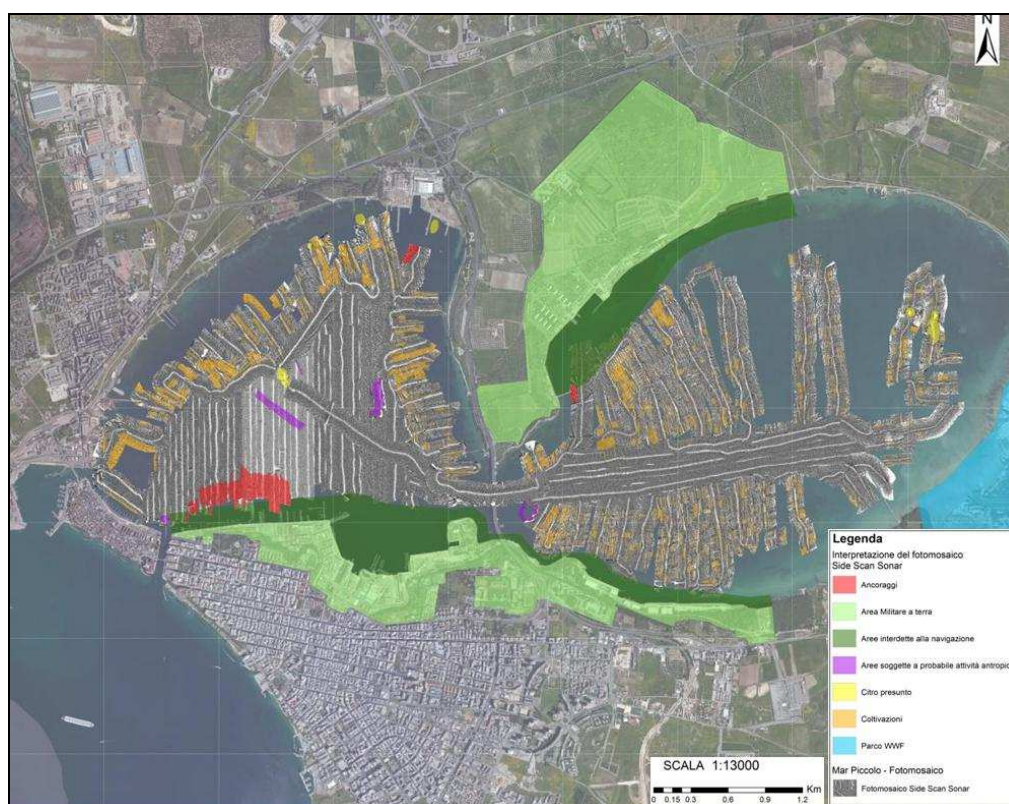


Figura 2. Rilievo Side Scan Sonar.

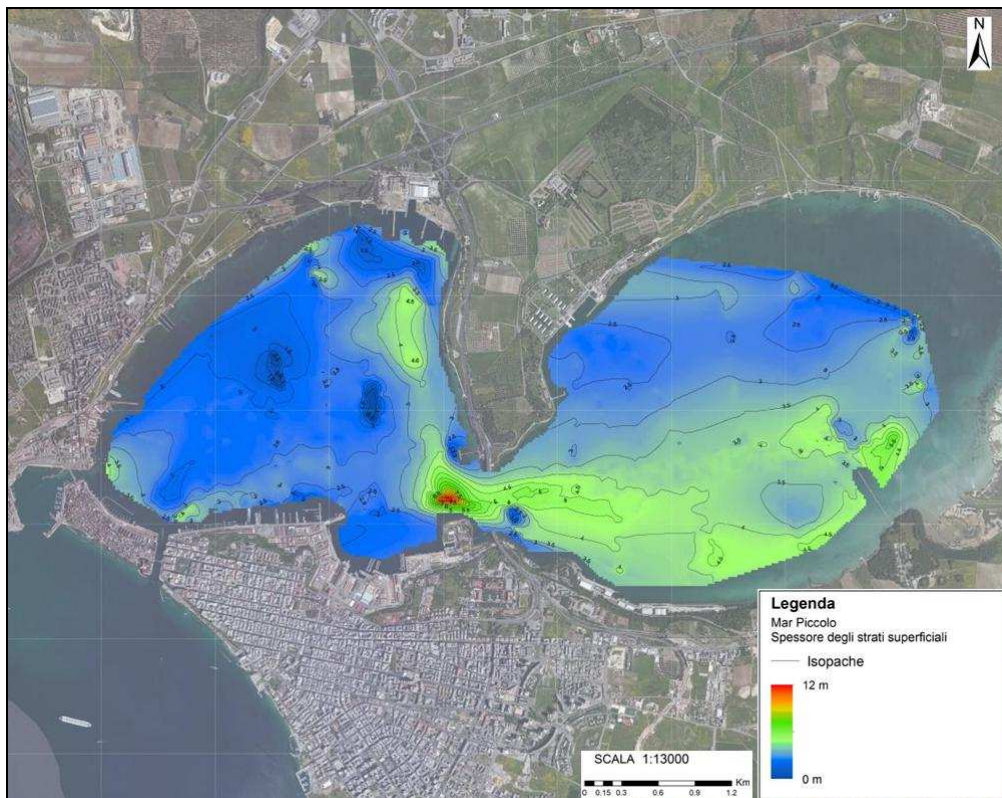


Figura 3. Rilievo dello spessore dei sedimenti (Sub Bottom Profiler).

Integrazione ed interpretazione dei risultati

Dall'interpretazione integrata dei dati provenienti dai rilievi *multibeam*, *side scan sonar* e *sub bottom profiler* è stato possibile tracciare alcuni aspetti legati alla geomorfologia, alla geologia strutturale superficiale ed alla stratigrafia dell'area investigata, riguardanti, essenzialmente, le attività antropiche che hanno modificato la batimetria del Mar Piccolo e la risalita in superficie di acque contenute in pressione nelle falde acquifere sottostanti.

Nel 1° seno, nel settore sud-occidentale in prossimità dell'ingresso nel Mar Piccolo sia il DTM sia i profili SBP mettono in evidenza come la morfologia sia strettamente collegata ad operazioni umane che hanno portato ad un approfondimento dell'area (escavi del fondale). La non perfetta verticalità delle pareti del presunto scavo insieme ad un fondo non regolare con probabili materiali provenienti da frane delle pareti fa ipotizzare un'età relativamente antica dello scavo stesso. Nel settore centrale e centro-orientale, in una zona particolarmente ampia è evidente un lungo canale orientato sud-est nord-ovest leggermente meno profondo delle aree circostanti ed un'area estesa, di forma rettangolare e caratterizzata al suo interno da un gradino morfologico.

Nel 2° seno, nell'area subito ad est di Punta Penne, allo sbocco orientale della via di comunicazione fra i due seni è stata messa in evidenza un'area a profondità maggiore rispetto alle aree circostanti. Anche in questo caso la verticalità delle pareti testimoniano l'origine antropica di questa depressione la cui profondità sembra aver raggiunto il tetto dei sedimenti pre-trasgressione marina.

Per quanto riguarda i citri nel 1° seno, i rilievi geofisici effettuati, oltre a mettere in evidenza la presenza di depressioni di forma conica legate alla risalita in pressione di acqua dal substrato e di cui la figura seguente mostra una serie di immagini riferite al Citro Galeso, hanno portato alla scoperta di una morfologia simile ubicata nella zona centro-settentrionale dello stesso seno. È stato possibile anche rilevare una nuova area in cui la non verticalità delle pareti della depressione, unita alla presenza di materiale a morfologia rilevata

sul fondo, alla vicinanza al fondo della depressione di riflettori non piano paralleli, e alla forma conica, fanno ipotizzare che si tratti di una morfologia strettamente legata alla risalita di acqua in pressione dal substrato.

Analogamente, nel 2° seno il profilo sub bottom conferma la presenza “storica” dei citri, come ad esempio quello denominato “Le Copre”, così come la presenza di una morfologia ondulata del fondo, data verosimilmente dalla presenza al di sotto di polle di acqua in risalita.

Complessivamente, pertanto, i rilievi geofisici e geomorfologici oltre a fornire una rappresentazione molto dettagliata della morfologia, batimetria e stratigrafia dei due bacini del Mar Piccolo hanno evidenziato una estrema dinamicità dei fondali ed un conseguente *precario equilibrio* collegato sia alla geologia e stratigrafia del substrato, sia alla variabilità delle emissioni di acqua dolce (fenomeni di intensa risalita d’acqua in pressione).

In Figura 4 si evidenziano alcune delle particolarità di ordine morfologico e degli aspetti strutturali emersi a seguito dei rilievi geofisici.

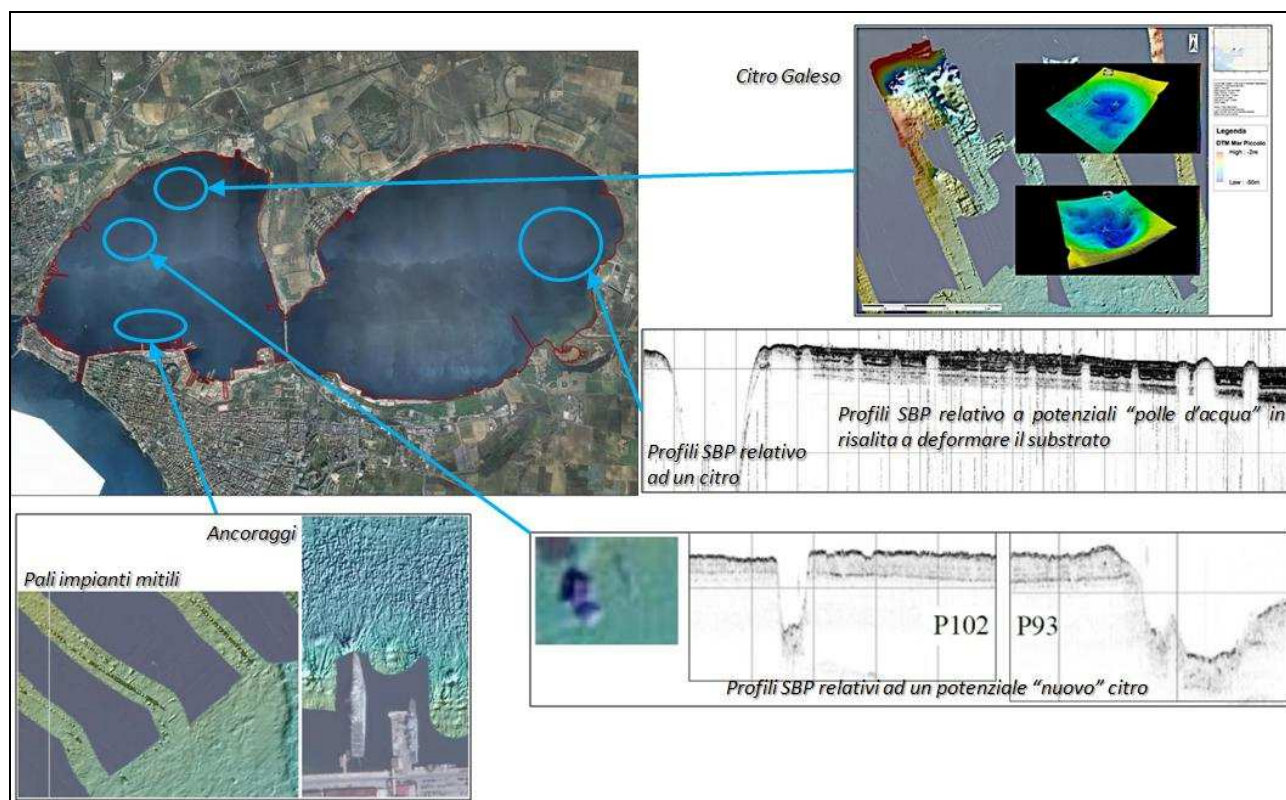


Figura 4

2.1.2. Mappatura biocenotica dei fondali

Le principali caratteristiche idrografiche naturali del Mar Piccolo di Taranto sono in gran parte riconducibili a quelle degli specchi d’acqua costieri in comunicazione con il mare aperto ed a lento ricambio idrico, e tipiche delle acque di transizione. Nel caso specifico queste hanno subito nel tempo una rilevante influenza antropica che, alterando alcune delle forzanti ambientali, ha di fatto determinato un parziale depauperamento del valore naturalistico caratteristico di queste tipologie di ambienti naturali.

Le attività di studio pregresse (Parenzan, 1969; progetto SPICAMAR 2001-2002; Matarrese et al., 2004; tesi di dottorato di ricerca del 2011), finalizzate alla definizione della tipologia e stato di conservazione delle

realità biocenotiche dei fondali del Mar Piccolo, sono state la base di partenza della nuova campagna di indagine condotta nel 2013. In tali documenti è emerso come, già dalla fine degli anni sessanta, alcune biocenosi importanti come le praterie di *Posidonia oceanica* avessero subito un'importante ridimensionamento per la concomitante presenza ed impatto di attività antropiche quali scarichi urbani, l'arsenale della Marina Militare, il porto polifunzionale, l'industria petrolchimica e la massiccia presenza di impianti di mitilicoltura.

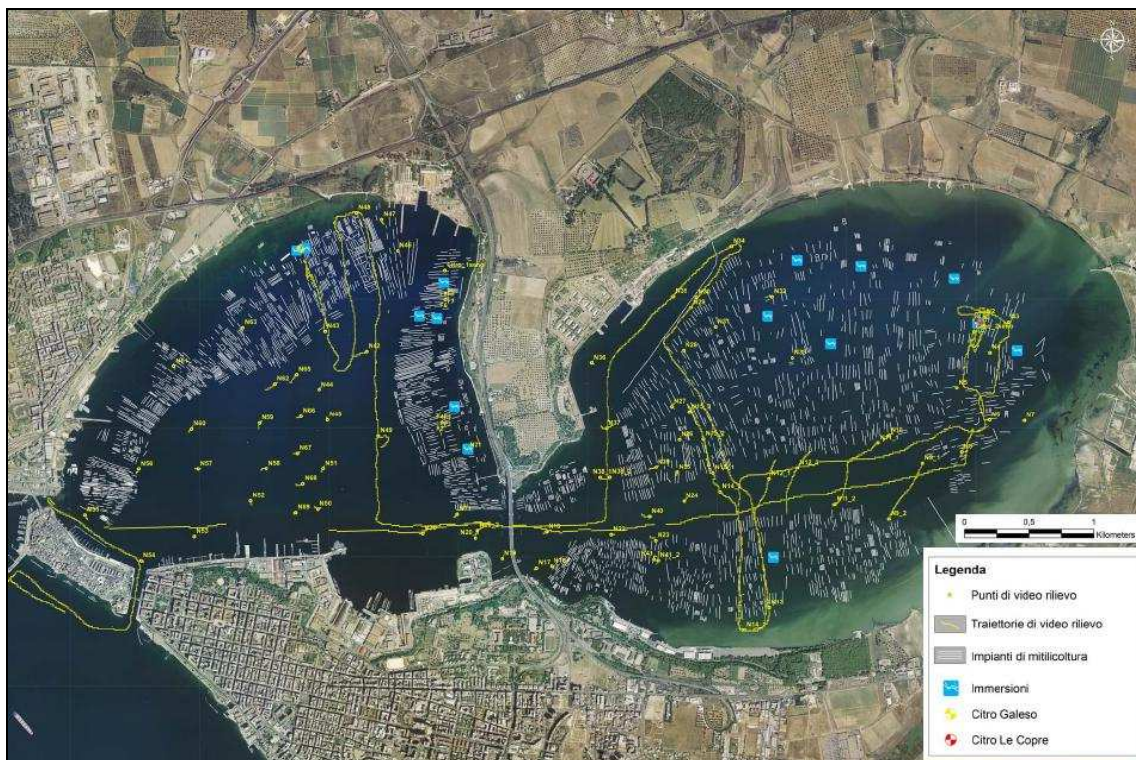


Figura 5

È stato, pertanto, progettato e realizzato un nuovo video-rilievo georeferenziato e completo dei due seni mediante telecamera a traino o, nei casi in cui la torbidità o impedimenti fisici alla navigazione (come ad es. i pali per l'allevamento dei mitili) ne impedivano l'utilizzo o l'operatività in sicurezza, impiegando operatori subacquei muniti di telecamera. Non è stato comunque possibile estendere l'indagine alle aree militari o a quelle realmente inaccessibili (Figura 5). Operativamente è stato definito un piano di monitoraggio che ha previsto, previa suddivisione delle aree in un opportuno grigliato d'indagine, la pianificazione delle rotte di navigazione e dei punti di immersione nonché la mappatura dei filari fissi e galleggianti degli impianti di mitilicoltura (ancora attivi o relitti), oltre che ad aree militari interdette alla navigazione e zone con ancoraggi. Sono stati effettuati in tutto 74 videoriprese, su transetti lineari o indagini spot per motivi di sicurezza della navigazione. Inoltre, sono state effettuate 15 immersioni subacquee nei punti di maggiore interesse come i citri, le aree caratterizzate da una notevole presenza di pali per la mitilicoltura e le aree che risultavano particolarmente interessanti in seguito all'analisi del rilievo batimetrico precedentemente effettuato. Le videoriprese geo-referenziate in funzione delle traiettorie effettuate sono state classificate in base al tipo di sedimento osservato ed alla presenza-assenza sui fondali di eventuale copertura vegetale. Le immersioni subacquee infine hanno permesso di caratterizzare meglio le aree ritenute più interessanti e/o non raggiungibili mediante l'imbarcazione con telecamera a traino.

Caratterizzazione biocenotica

Il 1° Seno è risultato caratterizzato, nella parte meridionale e centrale, da una ampia area di fondale sabbio-fangoso privo di copertura algale macrofitica, nella cui area mediana è presente una scarsa copertura algale con una facies sabbio-fangosa a *Paracentrotus lividus* (riccio viola) associata agli innumerevoli substrati duri secondari (per lo più detriti e/o rifiuti della mitilicoltura). Sono presenti anche specie più tipicamente vasicole come l'ofiuira *Amphiura chiajei* e i molluschi opistobranchi *Melibe viridis* e *Bursatella leachi*, nonché i pesci del genere *Gobius*. Intorno a quest'area sabbio-fangosa e lungo il versante occidentale del 1° Seno è presente un'area in cui il fondale risulta ricoperto, quasi uniformemente, da macroalghe quali l'alga verde *Caulerpa prolifera*, l'alga rossa *Gracilaria dura* e l'alga bruna *Dictyota dichotoma*, su cui sono comuni gli anellidi policheti *S. spallanzani* e *B. luctuosum* e i cavallucci marini *Hippocampus ramulosus* e *Hippocampus hippocampus*. In prossimità del canale navigabile, invece, è presente un substrato grossolano di natura conchiglifera su cui spesso risulta abbondante il briozoo *Zoobotryon verticillatum*. Nella porzione più settentrionale del 1° seno, i fondali risultano ricoperti da un feltro algale pleustofitico caratterizzato essenzialmente dall'alga verde *Chaetomorpha linum* che forma uno spesso feltro (20-30 cm), tale da rendere anossico il substrato sottostante. Su tale feltro possono essere rinvenuti organismi come l'ascidiaceo *Ciona intestinalis*, il mollusco opistobranco *Dendrodoris limbata* e il cavalluccio marino *H. guttulatus*. Nelle zone in cui il feltro algale pleustofitico risulta rado o assente (*C. linum* ha una distribuzione a patch), il fondale sabbio-fangoso o detritico ospita numerosi individui di *Pachycerianthus solitarius*, soprattutto in prossimità del citro Galeso. Lungo la costa a Nord e lungo il versante occidentale del bacino, inoltre, è ancora presente una sottile fascia di fondale sabbio-fangoso colonizzata dalla fanerogama marina *Cymodocea nodosa*, un tempo molto diffusa nell'intero bacino. Nel corridoio tra i due seni e all'ingresso del 2° seno, parte della copertura macroalgale (soprattutto a *Caulerpa prolifera*, *Gracilaria dura*, *Dictyota dichotoma*) risulta caratterizzata dall'abbondante presenza del mollusco lamellibranco *Flexopecten glaber* (facies a Pectinidi), ed in prossimità di un prato a caulerpacee essenzialmente costituito dalla specie endemica *Caulerpa prolifera* accompagnata da alcuni talli della specie alloctona *C. racemosa* var. *cylindracea* (Figura 6).

La porzione orientale del 2° seno e buona parte dell'area centrale risultano caratterizzate dalla presenza di uno spesso strato pleustofitico composto essenzialmente dalle Clorofite *Chaetomorpha linum* (già evidenziata anche nel 1° Seno) e ulvacee. Il feltro algale pleustofitico ricopre buona parte del bacino fatta eccezione per una parte centrale più profonda, caratterizzata da substrato sabbio-fangoso privo di copertura vegetale. Più a sud si evidenzia la presenza di un'altra prateria a caulerpacee come quella evidenziata nei pressi del corridoio tra i due seni. Anche nel secondo seno è presente, lungo il versante Nord-Est, un'area ricoperta da una fitta copertura algale con *Cladophora prolifera*, *Gracilaria dura* e *Dictyota dichotoma*, mentre a Nord Ovest è presente una sottile fascia con *Cymodocea nodosa* su fondale sabbioso. In corrispondenza del citro Le Copre, che si approfonda sino a oltre -30 m, si evidenzia un substrato grossolano con abbondanti resti conchigliiferi caratterizzati dalla presenza del Briozoo flottante *Zoobotryon verticillatum* (Figura 6).

Per quanto riguarda la fauna censita, particolare attenzione dal punto di vista biologico riveste quella associata ai numerosi substrati duri di origine secondaria (antropica) presenti in entrambi i seni, quali pontili, strutture metalliche affondate e boe metalliche ma, soprattutto, pali e strutture di sostegno usate per la molluschicoltura, che ricoprono più del 50% della superficie dell'intero specchio acqueo. Tutte queste strutture rigide fungono di fatto come substrati coerenti a disposizione delle specie *fouling* lungo tutta la colonna d'acqua. Ad esempio, sui pali usati per la mitilicoltura si evidenzia un'elevatissima abbondanza di filtratori (anellidi policheti, briozoi, ascidie solitarie e coloniali, poriferi, echinodermi, antozoi, molluschi gasteropodi e bivalvi nonché un gran numero di mitili provenienti dagli allevamenti). Tra i pali, così abbondantemente rivestiti dalle specie *fouling*, soprattutto lungo le coste del versante occidentale del primo seno e del versante orientale del secondo seno, sono presenti abbondanti popolazioni dei Signatidi *Hippocampus guttulatus* e *H. hippocampus* (cavalluccio marino) e *Syngnathus spp.* (pesce ago), spesso presenti anche sul sottostante fondale ricoperto dall'abbondante feltro algale pleustofitico a *Chaetomorpha*

linum e nelle aree ricoperte dalle macroalghe *Cladophora prolifera*, *Gracilaria dura* e *Dyctyota dichotoma*. Inoltre, nell'area caratterizzata dalla presenza dei pontili sommersi, lungo il versante occidentale del primo seno, sono stati avvistati e filmati due giovani esemplari di *Epinephelus marginatus* (cernia bruna).

Analogamente, anche in prossimità dei citri si riscontrano situazioni degne di nota. In particolare nel 1° seno, nei pressi del citro Galeso (- 16 m) si evidenzia una vera e propria facies del giglio di mare (*Antedon mediterranea*) in associazione con altre, che, in prossimità del collettore metallico del citro Galeso, raggiunge densità di migliaia esemplari per metro quadrato. Sul fondale sabbio-fangoso circostante il suddetto citro, si evidenzia una facies dei cerianti *Pachycerianthus solitarius* e *Cerianthus membranaceus*, oltre a esemplari, anche di grosse dimensioni, del bivalve *Pinna nobilis*. Nei pressi del citro Galeso è stata rinvenuta anche una popolazione stanziale di grossi cefali (*Mugil cephalus*). Infine, si segnala la presenza di esemplari della tartaruga marina *Caretta caretta* che occasionalmente si spingono in Mar Piccolo per alimentarsi.

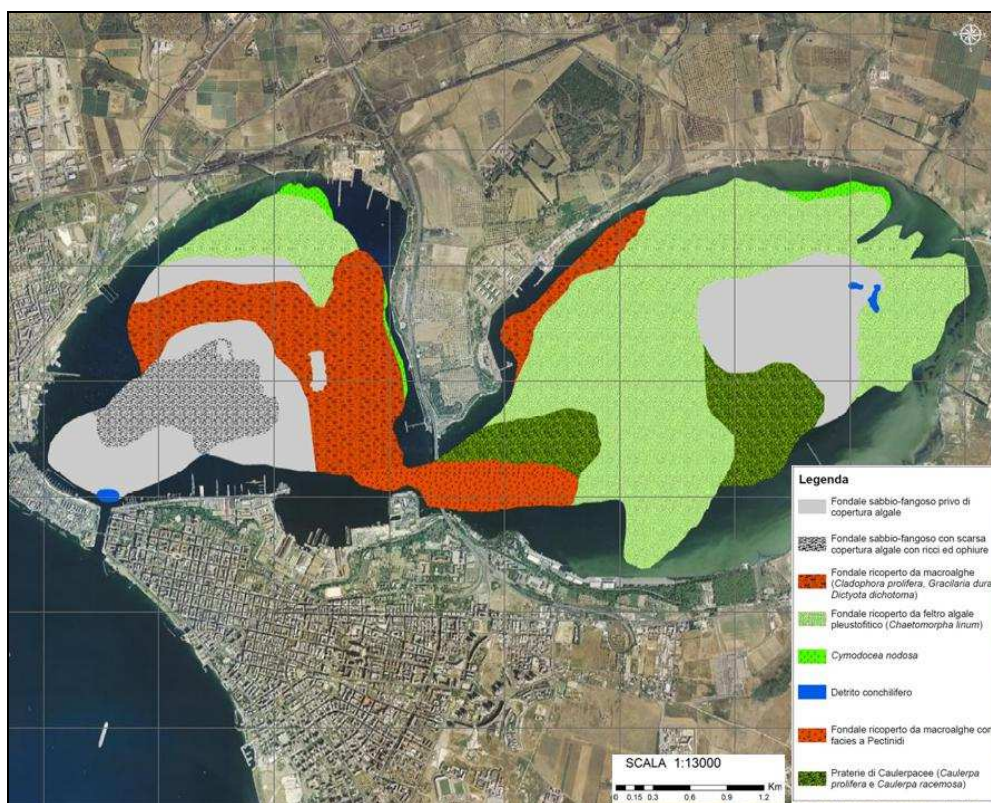


Figura 6. Mappatura biocenotica dei fondali del Mar Piccolo.

Aspetti salienti dei rilievi biocenotici

Come emerso dall'interpretazione dei video-rilievi, l'intero bacino di Mar Piccolo è caratterizzato da una peculiare biodiversità sia vegetale sia animale, composta per la maggior parte da macroalghe nitrofile e organismi filtratori che ben si adattano al regime di trofia di tale bacino. Esiste, comunque, una forte influenza sulla composizione della biodiversità da parte delle attività antropiche realizzate nell'area come, ad esempio, la mitilicoltura che ha condizionato proprio la caratteristica dei sedimenti, ricoperti da uno spesso strato pelitico (Figura 7).

La maggiore biodiversità riscontrata è associata alle comunità di *fouling* che si sviluppano sui substrati coerenti di origine secondaria (antropica), mentre il sottostante substrato sabbio-fangoso è ricoperto, per

buona parte, da macroalghe. In generale per questo tipo di comunità, numerosi studi di letteratura hanno dimostrato la capacità di abbattere la carica batterica lungo la colonna d'acqua e di accumulare alcuni contaminanti all'interno dei tessuti animali.

Questa elevata biodiversità (in numero e specie), che contribuisce al mantenimento dei sottili equilibri ecologici all'interno del bacino nonostante i numerosi impatti antropici presenti, unita alle elevate capacità di autoregolazione e di reazione del sistema sono indicatori di grandi potenzialità di ripresa dell'area dal punto di vista naturalistico ed ambientale.

All'interno del bacino va anche segnalata la presenza di specie protette secondo il protocollo SPA/BIO (Convenzione di Barcellona), quali i poriferi *Tethya citrina* e *Geodia cydonium*, il bivalve *Pinna nobilis*, il crostaceo *Maja squinado*, il riccio viola *Paracentrotus lividus*, i teleostei *Epinephelus marginatus*, *Aphanius fasciatus*, *Signatus* sp., *Hippocampus hippocampus* e *H. guttulatus*, nonché la tartaruga marina *Caretta caretta*. Tali specie, inserite nel protocollo di protezione ASPIM (Aree Specialmente Protette di Interesse Mediterraneo), sono importanti anche per il turismo subacqueo e, insieme ad altre specie di grande valore estetico come i nudibranchi *Chromodoris luteorosea*, *Janolus cristatus* e *Cratena peregrina*, nonché i cerianti *Cerianthus membranaceus* e *Pachycerianthus solitarius*, valorizzano il bacino di Mar Piccolo anche dal punto di vista estetico e ricreativo. Infatti, grazie alla particolarità e all'unicità degli habitat presenti, alla biodiversità nonché alla facilità di accesso e raggiungimento dei punti di immersione, il Mar Piccolo viene attualmente considerato uno dei dieci punti di immersione più belli dei mari di Taranto, di sicura attrattiva per il crescente turismo subacqueo in questo bacino.

Negli ultimi decenni è stata anche osservata la presenza di numerose specie alloctone (almeno 24), tra cui le più comuni: l'alga verde *Caulerpa racemosa* var. *cylindracea*, gli opistobranchi *Melibe viridis* e *Bursatella leachi*, il bivalve *Arcatula senhousia*, gli ascidiacei *Polyandrocarpa zorritensis*, *Distalia bermudensis*, *Microcosmus squamiger*, il porifero *Paraleucilla magna* e l'anellide polichete *Branchiommma luctuosum*). Tutte queste specie sono legate alle caratteristiche del bacino stesso (ambiente di transizione semi-chiuso, poco profondo, fortemente condizionato dal variare delle condizioni atmosferiche e pertanto facilmente soggetto a forti variazioni del regime termico e salino, nonché a periodiche anossie estive) ed alle attività antropiche che vi insistono.

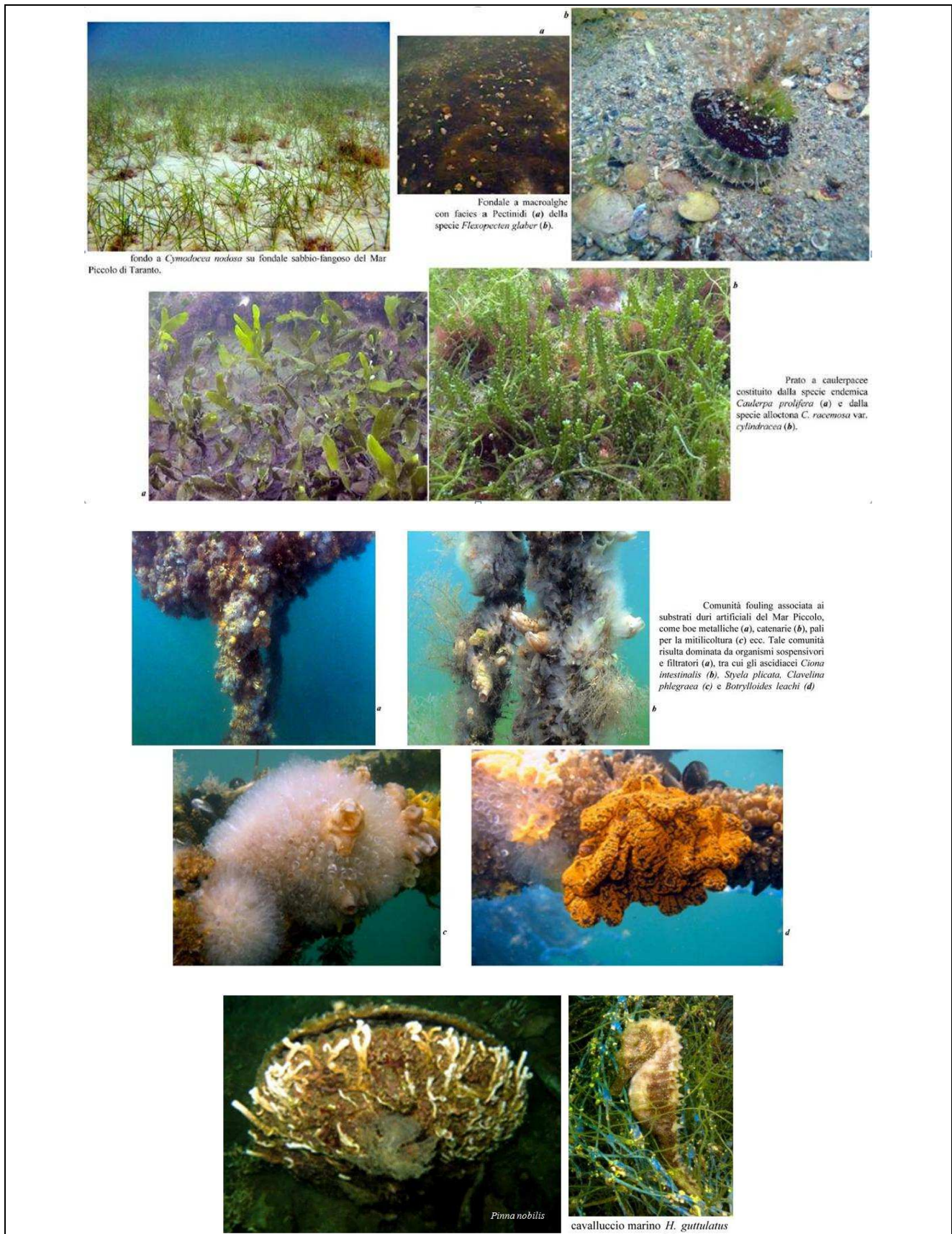


Figura 7

2.2. MODELLO GEO-MORFO-STRATIGRAFICO

L'area di studio si sviluppa sulle superfici più basse di una gradinata degradante verso mare costituita da depositi calcarenitici trasgressivi (sedimenti dei terrazzi marini) del Pleistocene medio e superiore, che poggiano, in trasgressione, sulle unità del basamento locale (Figura 8. Questo è caratterizzato dalla presenza di una successione – dal basso verso l'alto – di calcari Mesozoici (Calcarea di Altamura), di calcareniti ed argille del Plio-Pleistocene (Calcarenite di Gravina ed argille subappennine). I calcari del basamento sono interessati da una serie di dislocamenti che ne permettono di riconoscere la presenza a circa 10 m s.l.m a nord del Mar Piccolo mentre sono individuati in terebrazioni a circa -200 m dal p.c. nella zona di Capo San Vito (circa -80 m in corrispondenza del collegamento tra i due seni, fra Punta Penne e il Pizzone).

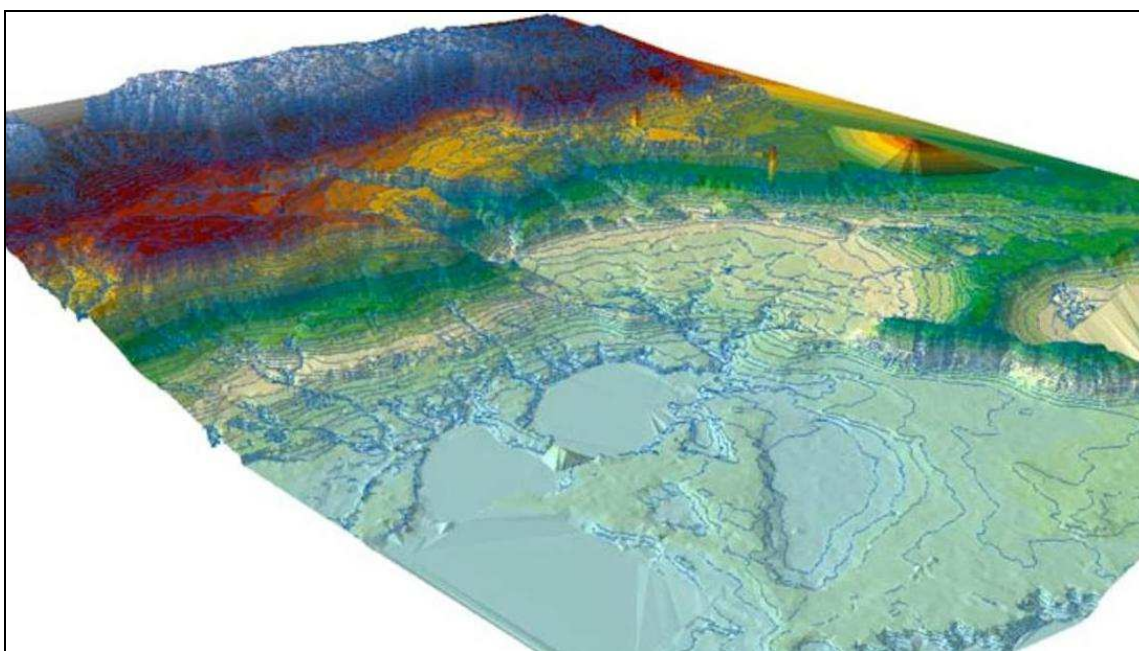


Figura 8

Dal punto di vista fisico il paesaggio è il risultato della combinazione del sollevamento regionale, delle variazioni glacio-eustatiche del livello del mare e delle variazioni di energia del reticolo idrografico ad esse strettamente connesse. Esso, infatti, è caratterizzato da una serie di terrazzi marini disposti a gradinata, debolmente inclinati verso mare e da una serie di depressioni di forma sub-ellittica del Mar Grande e dei due seni del Mar Piccolo. Altre depressioni (Salina Grande, Salina Piccola, San Brunone e Palude Rasca) sono, invece, legate a fenomeni di *suffosione* e di erosione ad opera del flusso superficiale delle acque che raggiungono il reticolo idrografico principale.

L'area intorno al Mar Piccolo è caratterizzata dalla presenza di un corpo calcarenitico ben cementato di spessore variabile sino a circa 20 m in trasgressione su argille plio-pleistoceniche (con massimi spessori sull'isola verso SSW e il Mar Grande), che tende a diminuire gradualmente in direzione SSE verso il Borgo, e NNW verso il Rione Tamburi e, bruscamente, a NNE verso il salto di quota che si affaccia sul Mar Piccolo. L'insenatura del Mar Piccolo e la rada del Mar Grande corrispondono a due valli fluviali successivamente inondate dal mare durante la trasgressione Olocenica.

Dal punto di vista geologico, lo studio condotto ha permesso di definire una carta geologica dei depositi del Mar Piccolo e delle aree immediatamente adiacenti ad esso in scala 1:15.000 corredata da 6 sezioni geologiche e da schemi sui rapporti stratigrafici (Figura 9).

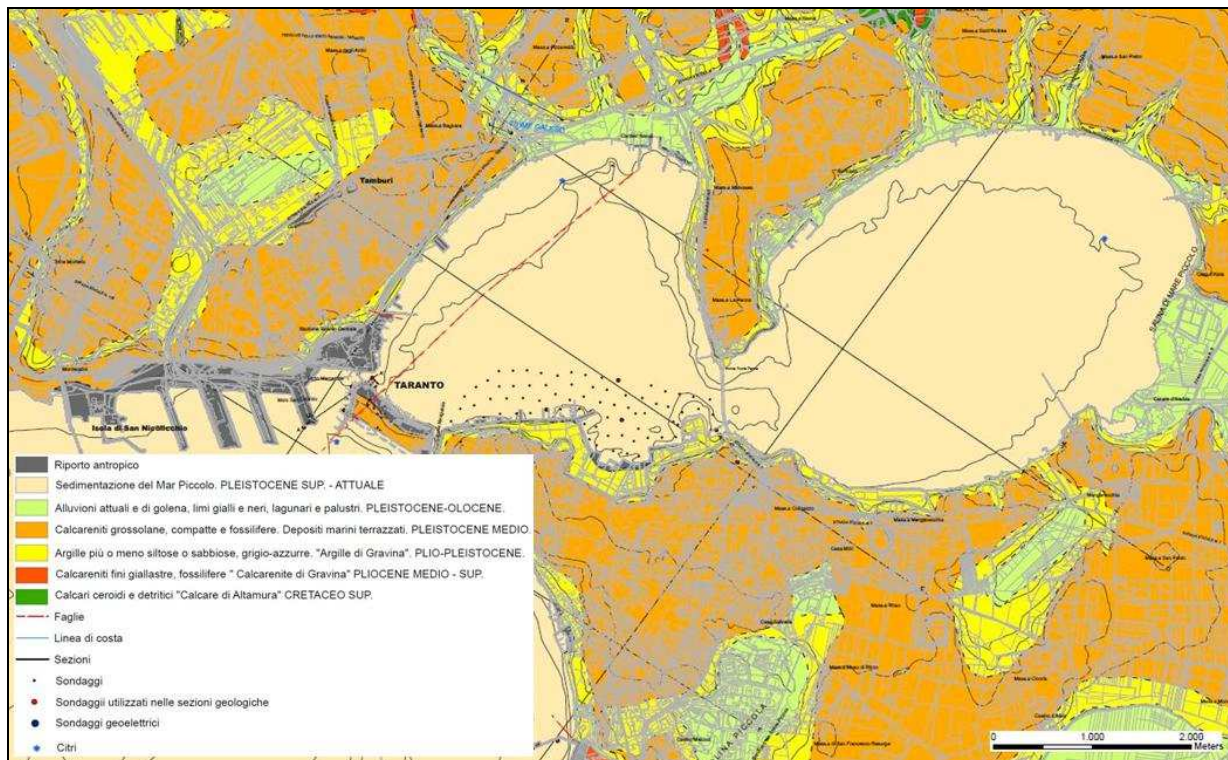


Figura 9

Sono stati, pertanto, raccolti, sistematizzati e validati i dati pregressi derivanti dalla letteratura scientifica disponibile e dalle indagini geologiche dirette e indirette eseguite da Enti pubblici e privati, georeferenziando e organizzando queste informazioni in ambiente GIS. Complessivamente sono stati censiti 150 sondaggi di cui: 50 a carotaggio continuo (spinti fino ad una profondità massima di 98 metri), 11 a carotaggio continuo realizzati in mare (spinti fino ad una profondità massima di 52 metri), 1 a distruzione di nucleo realizzato in mare (spinto fino ad una profondità di 22.5 metri), 75 con un vibrocarotiere (spinti fino ad una profondità massima di 5 metri), 7 di tipo geognostico (spinti fino ad una profondità massima di 64 metri) e 6 stratigrafie di successioni affioranti. Inoltre, sono stati realizzati *ex novo* 3 sondaggi di tipo geoelettrico realizzati nell'ambito di questo progetto.

Lo studio è stato completato con la lettura della cartografia ufficiale (F°202 "Taranto" in scala 1:100.000) e con l'ausilio delle cartografie e delle sezioni geologiche derivanti dalla letteratura. I dati introdotti nel GIS hanno permesso di costruire un modello digitale del terreno (DEM) con una risoluzione nell'ordine dei 5 metri per la parte emersa e variabile dai 5 ai 10 metri per la parte sommersa.

L'analisi dei dati evidenzia che la profondità del basamento locale rappresentato dal calcarea di Altamura varia da nord a sud. Rispetto al piano campagna o rispetto al livello del mare la presenza di salti di quota significativi in poche centinaia di metri di distanza fa ipotizzare la presenza di strutture tettoniche "dislocative". La profondità del tetto dei carbonati risulta variabile da circa -17 m nella zona della sorgente del fiume Galeso e del citro omonimo a circa -50 m in corrispondenza della Città. È così possibile ipotizzare la presenza di una struttura tettonica dislocativa in regime distensivo che interessa l'allineamento fra l'area di foce del fiume Galeso ed il citro di San Cataldo, in Mar Grande.

Per quanto riguarda le caratteristiche sedimentologiche dell'area si è proceduto da un lato valutando i dati presenti in letteratura e dall'altro integrando le conoscenze pregresse con i nuovi rilievi *sparker*. Il quadro geologico emerso vede, sostanzialmente al di sopra dei calcari mesozoici, in discordanza, le unità plio-pleistoceniche (Calcarenite di Gravina e argille subappennine) connesse alla fase di subsidenza dell'intero Avampaese apulo coinvolto nella subduzione al di sotto dell'Appennino meridionale. Il sollevamento, che

inizia alla fine del Pleistocene inferiore, determina la formazione di una serie di unità marine ed alluvionali terrazzate che si rinvencono, dalle più antiche alle più recenti, a quote via via decrescenti sul livello del mare.

È stato possibile valutare anche gli spessori delle unità sedimentarie di interesse, nonché le loro variazioni laterali, procedendo dai calcari mesozoici che affiorano in tutto il settore settentrionale dell'area investigata. In particolare sono state identificate: le Calcareniti di Gravina con spessori nel Mar Piccolo che non superano mai i 2-3 metri; le argille subappennine con spessori estremamente variabili (da 10 a 65 m); i depositi marini terrazzati affioranti in settori marginali con spessori variabili da 5 a 30 metri; i depositi alluvionali recenti ed attuali, con spessori variabili da 1 a 20 m; i depositi olocenici del Mar Piccolo, con spessori variabili da 0.5 ad un massimo di 11 m (Figura 10).

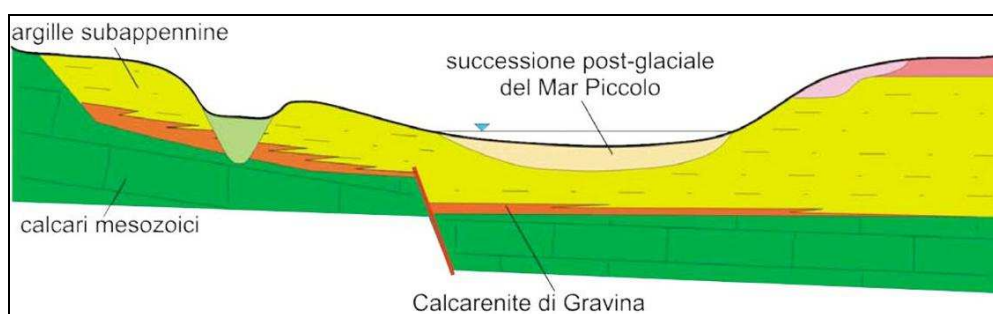


Figura 10

Si evidenzia, inoltre, come, fatti salvi i depositi dei terrazzi marini, mai rinvenuti nel Mar Piccolo, le variazioni di spessore interessano soprattutto le argille subappennine ed i depositi olocenici. Le Calcareniti di Gravina hanno spessori che si azzerano nel Mar Piccolo e la superficie che limita inferiormente la Calcarenite di Gravina e le argille subappennine è una superficie poligenetica formatasi a partire dalla fine del Cretaceo superiore, modellata da lunghi processi erosivi di natura sedimentaria e carsica e viene interessata dall'ingressione marina solo nel Pliocene. I depositi di mare poco profondo della Calcarenite di Gravina passanti lateralmente e verticalmente a quelli di piattaforma esterna delle argille subappennine poggiano in trasgressione sui calcari cretacei con un tipico rapporto di *onlap* costiero lungo i pendii degli alti morfostutturali dell'Avampaese apulo emerso.

Al contrario, la grande variabilità degli spessori dei depositi olocenici del Mar Piccolo è spiegabile in base all'estrema irregolarità della superficie erosiva formatasi durante l'ultimo glaciale in ambiente continentale. Essa è intagliata in tutte le unità sedimentarie precedentemente descritte e nelle argille subappennine. Tale superficie erosiva presenta tutti i caratteri delle valli incise le quali sono in seguito riempite da depositi fluviali, estuarini e marini al variare di numerosi fattori (morfologia, pre-sedimentaria, input sedimentario, velocità ed entità di risalita del l.m.m., ecc.). I dati rinvenuti dalle perforazioni censite nell'area, per quanto frammentari, indicano chiaramente delle rapide variazioni litologiche verticali all'interno della successione olocenica.

Per definirne le caratteristiche strutturali del sottosuolo è stata realizzata a terra una campagna di prospezione geoelettrica mediante indagini tomografiche per valutare la resistività elettrica della zona circostante la sorgente Galeso. Operativamente è stata applicata una corrente continua nel terreno per mezzo di due elettrodi in acciaio e nel misurare la differenza di potenziale mediante altri due elettrodi detti "elettrodi di tensione". Sono stati, pertanto, definiti vari modelli di resistività ed una rappresentazione complessiva. È stato quindi possibile individuare un primo strato conduttivo non superiore ai 10 m di spessore al cui interno la parte più conduttiva è associabile alla presenza di una falda superficiale. Analogamente è emerso come il substrato resistivo sia discontinuo ed associabile a zone fratturate permeate da fluidi.

Per definire le caratteristiche strutturali del bacino del Mar Piccolo è stata prevista una campagna di indagini *sparker* (Figura 11), realizzando una serie di rilievi sismici lungo rotte predeterminate nei due seni. Tali indagini hanno consentito di investigare la struttura del sottosuolo anche fino a 150-200 metri di profondità, anche se con minor dettaglio rispetto ai rilievi geofisici condotti con *sub bottom profiler*, e di definire i caratteri litologici dei vari strati in funzione della diversa propagazione dell'impulso sismico all'interno del corpo roccioso.

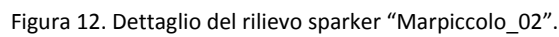


Figura 11

Va segnalato come la presenza diffusa dei pali per la mitilicoltura (affioranti o immediatamente immersi) insieme alle caratteristiche proprie del sistema di rilievo impiegato hanno creato non pochi problemi alle operazioni di campo, determinato in tre occasioni la interruzione delle registrazioni e nella zona del Galeso l'impossibilità di effettuare alcuni passaggi. Inoltre proprio sul Citro del Galeso la presenza delle strutture di captazione ha creato echi di ritorno che non hanno permesso la registrazione del segnale assolutamente distorto.

In tutti i profili sismici acquisiti si è registrata un'ottima penetrazione del segnale acustico (tra 20 m fino a 80 m), evidenziando come il sottofondo marino sia costituito da una coltre di sedimenti sciolti di granulometria compresa fra le sabbie, i limi e le argille, almeno fino alle massime penetrazioni del segnale *sparker*, e di come questi si appoggino in discordanza su un riflettore profondo. Sono anche ben evidenti le morfologie riconducibili alle polle di acqua dolce (citri e strutture ad essi connesse). Una volta evidenziate le caratteristiche principali presenti nel set dati è stato possibile classificare i corpi sedimentari e correlarli con le *facies* presenti nell'area.

In particolare sono riconosciute tre *facies* sismiche (Figura 12): la prima, quella più superficiale, è presumibilmente correlabile alle unità costituite da sedimenti fini post glaciali e recenti; la seconda può essere interpretata come unità delle argille subappennine; la terza rappresenterebbe il basamento carbonatico presente nell'area. Non è stato possibile identificare un limite tra calcareniti plio-pleistoceniche e i calcari mesozoici.



Legenda

- Terrazzo marino MSL 5.3
- Terrazzo marino MSL 5.5
- Terrazzo marino di accumulo (età sconosciuta)
- Terrazzo fluviale
- Sistema difeso
- Stagno costiero
- Area paludosa
- Dietro di linea
- Superficie di erosione
- Superficie di alluvamento
- Riparto antropico
- Opere di difesa costiera e paronali di forte armata
- Alveo artificiale
- Canali di bonifica
- Limiti di forma
- Dune
- Reticolo idrografico
- Scarpe fluviale
- Falsella
- Falsella inattiva
- Città
- Risorgenti d'acqua

0 1.000 2.000 Metri

Il carattere del Mare Piccolo quale forma fluviale relitta, fossilizzata dall'attuale carattere marino e/o di transizione (mare interno) pare essere confermato dalla sua storia recente. Tra i dati storici va segnalato un

evento alluvionale di notevole entità avvenuto nella notte tra il 14 e il 15 settembre 1883, quando forti precipitazioni (180 mm in 4 ore) che colpirono l'arco orientale della provincia di Taranto fra Grottaglie, San Giorgio Jonico, Montemesola, Monteiasi, provocarono copiosi fenomeni di piena e di ruscellamento, riversando ingenti quantità di acque, e verosimilmente di sedimenti, nel bacino del Mar Piccolo, che a sua volta si sollevò fino a 2 m allagando parte della città vecchia e le campagne circostanti. L'area è stata colpita successivamente da altri fenomeni alluvionali (1996, 2005). Per definire nel dettaglio i caratteri morfologici delle strutture dei citri e per definire la successione stratigrafica messa in evidenza dalle indagini *sparkler* da quelle *sub bottom profiler*, in modo particolare dove si sono evidenziate strutture di dubbia interpretazione, sono state realizzate n. 4 immersioni, rispettivamente per il citro Galeso (-20 m) e Le Copre (-32 m) e per tre depressioni, una depressione articolata (-17 m) e due rettangolari (-18 m).

Per le depressioni, estese sino ad alcune centinaia di m², è evidente l'origine antropica per la presenza di un perimetro rettangolare e dalla discontinuità dei livelli deposizionali più recenti che appaiono tagliati.

Nel citro Galeso si è rilevato sul fondo, fra i -17 e i -20 m s.l.m., l'affioramento della Calcarenite di Gravina, dovuta all'alta velocità e continuità del flusso d'acqua che mantiene le pareti libere dalle deposizioni attuali di limi e silt. Questa formazione è rappresentata da bioclastiti da poco a ben cementate in stratificazione piano parallela suborizzontale interessate da fratture subverticali beanti. Le calcareniti mostrano abbondanti macroresti di molluschi bivalvi e di brachiopodi che permettono di riconoscere in esse le facies più profonde della loro deposizione prima della sedimentazione delle argille subappennine a loro eteropiche. Il contatto fra queste due unità litologiche non è visibile; esso si intuisce in corrispondenza della isobata -17 nel citro Galeso in quanto a questa profondità circa cambia l'inclinazione del versante dello stesso. In questo caso uno spessore di sedimenti siltoso-limosi maggiore di 60 cm copre quei versanti impedendo il riconoscimento diretto delle argille, la cui presenza è comunque evidente dalle indagini indirette.

Il citro Le Copre, caratterizzato dalla presenza di alcune decine di bocche effusive, la profondità massima raggiunge i circa 32 m, anche se in occasione di campionamenti effettuati nel 2011 la profondità rilevata era stata di 23 m. In questo citro il flusso idrico disperso in più bocche non riesce a tenere pulite le pareti coperte da importanti spessori (maggiori di 40 cm) di sedimento attuale. Il profilo del cono, nel sito dell'immersione, non evidenzia differenze di pendenza, lasciando ipotizzare che qui la profondità di affioramento del corpo carbonatico sia di circa 35 m.

Relazioni fra tettonica, carsismo, sedimentazione e variazioni del livello del mare

L'insieme delle indagini effettuate ha permesso di modellizzare l'evoluzione dell'intera area del Mar Piccolo, formulando un modello evolutivo complesso che permette di ricostruirne la dinamica geologica, quella morfologica e quella sedimentologica in relazione alle dinamiche geologiche. È stato possibile evidenziare il carattere erosivo dell'intero bacino. Esso è modellato su una successione di Calcarei cretaci, calcareniti e argille plio-pleistoceniche e depositi marini terrazzati del Pleistocene superiore.

I rilievi geofisici hanno permesso di evidenziare, a profondità differenti da nord a sud tra i -20 ed i -80 m di profondità decrescenti verso il Golfo di Taranto, la presenza di un riflettore profondo corrispondente alle *unità carbonatiche* (comprendendo sia i calcari cretaci sia le unità calcarenitiche plio-pleistoceniche). La presenza di faglie e fratture rende meno resistente lo strato carbonatico, permettendo, in alcuni casi, alla pressione idraulica della falda ospitata nelle stesse unità, di "venire a giorno" e creare i citri e le sorgenti, tipiche dell'area in esame.

Su tale unità poggiano le *argille subappennine*, con spessori sedimentari variabili e stratificazione fitta inclinata verso il Golfo di Taranto, l'area di massima deposizione (depocentro) del bacino sedimentario. Su queste argille si evidenziano superfici di erosione ed accumuli di sedimenti con una giacitura caotica che potrebbero corrispondere a corpi di frana, fossilizzati dalla deposizione conseguente alla trasgressione olocenica e da quella attuale, che evidenziano il carattere evolutivo del Mar Piccolo quale corso d'acqua relitto. Questa caratteristica è ancora oltremodo evidente in concomitanza ad eventi meteorologici

importanti, che determinano flussi idrici superficiali che tendono ad alluvionare le aree costiere più depresse.

Il corpo delle argille è ricoperto da depositi a giacitura piano-parallela di spessore variabile dai 3 agli 11 metri che dovrebbero corrispondere alle *peliti oloceniche* connesse alla deposizione in ambiente fluviale o alla trasgressione del mare nel corso dell'Olocene (ultimi 10 ka). Di queste lo spessore dei depositi di età antropica non dovrebbe superare i 5 m. Una stima della sedimentazione avvenuta fa ipotizzare un tasso di sedimentazione valutabile nell'ordine di 1 mm/anno.

Per i citri sono emersi fenomeni di distacco gravitativo connessi all'attività di scalzamento alla base delle argille indotto dal flusso verticale di acque dolci in pressione. I loro versanti, dove si leggono accumuli di sedimenti sub-attuali, sono infatti modellati essenzialmente nelle argille subappennine e solo alla base nelle unità carbonatiche sulle quali agisce l'azione erosiva dei flussi di acqua dolce.

La distribuzione dei citri sembra essere correlata alla presenza di linee tettoniche orientate localmente NNE-SSW, ben evidenti nei profili *sparker* e nelle indagini geoelettriche. Tali faglie, essenzialmente dirette, interessano le unità carbonatiche trasferendosi e deformando la base delle sovrastanti argille subappennine. Le geometrie di faglia riconosciute in corrispondenza della sorgente del Galeso potrebbe essere utilizzate per l'interpretazione dei citri che rappresentano la controparte sommersa (sia nel settore del Mar Piccolo che in Mar Grande) in quanto, la loro presenza sotto il livello del mare, è spiegabile semplicemente dal fatto che il mare ha trasgredito nell'Olocene solo sino alla posizione attuale, risparmiando alla sommersione le altre sorgenti di risorgiva quali la sorgente Galeso, la sorgente Battentieri, la sorgente Rasca, posizionate entro i due metri sopra il livello del mare.

In sintesi il modello geologico, geomorfologico e sedimentologico che è stato possibile ricostruire ha evidenziato (Figura 14):

- la presenza di sorgenti e di citri in corrispondenza della fratturazione del corpo carbonatico e possibilità che il carico idrostatico possa aprire nuove vie di flusso;
- instabilità dei versanti delle depressioni dei citri che, in caso di attivazione di movimenti gravitativi, potrebbero produrre ondate anomale;
- instabilità delle falesie presso Punta Penne e il Fronte che, in caso di attivazione di movimenti gravitativi, potrebbero produrre ondate anomale;
- verificarsi di immissione nel Mar Piccolo di importanti flussi idrici da parte dei principali immissari in corrispondenza degli eventi meteorologici più importanti a similitudine di quanto avvenuto nel 1883.

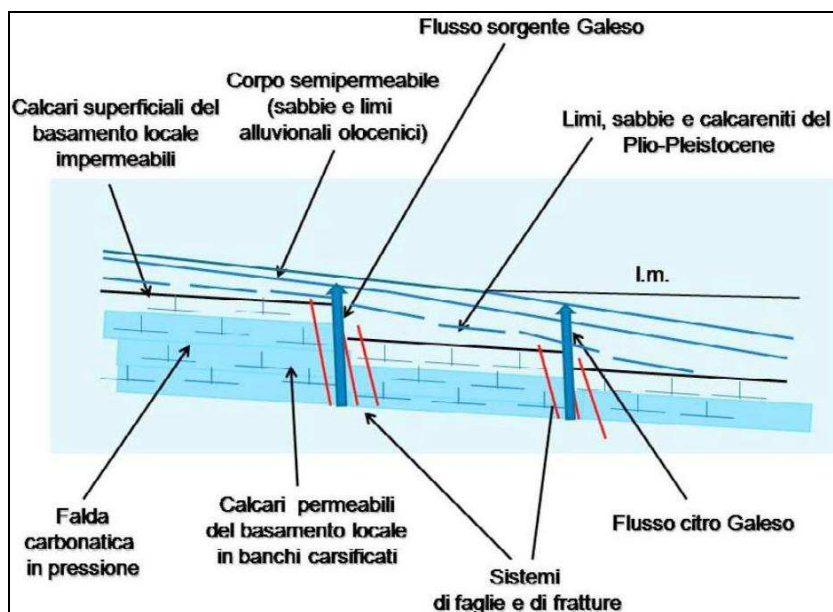


Figura 14

2.3. RETICOLO IDROGRAFICO PRINCIPALE (A CURA DEL POLITECNICO DI BARI – DICATECH)

L'attività ha riguardato l'individuazione e la successiva validazione della rete idrografica naturale che convoglia le acque di dilavamento nel 1° seno del Mar Piccolo.

L'impiego di sistemi informativi geografici (GIS), di rilievi da remoto ad elevato dettaglio (LIDAR), insieme ad algoritmi di interpolazione utili per rappresentare l'assetto morfologico del territorio (rilievo LIDAR in TIN e quest'ultimo in DEM), ha permesso la ricostruzione dell'assetto geomorfologico superficiale e, conseguentemente, aggiornare l'attuale reticolo ufficiale presente sulla carta idrogeomorfologica dell'Autorità di Bacino della Puglia (AdBP).

Al fine di validare e aggiornare il sistema di drenaggio naturale superficiale è stata effettuata un'analisi critica delle diverse informazioni disponibili: ortofoto a vari orizzonti temporali (1999, 2006, 2008); *Street View* di *Google Earth*; dati estratti dal LIDAR, supportando le scelte anche con sopralluoghi nelle zone caratterizzate da maggiore incertezza morfologica.

In Figura 15 è rappresentato il reticolo idrografico a valle delle verifiche e validazioni eseguite. A tal riguardo, il gruppo di lavoro del Politecnico, oltre a confermare il reticolo idrografico del Galeso quale corpo idrico principale immissario nel 1° seno del Mar Piccolo, per quanto riguarda il piccolo reticolo che drena le acque meteoriche che precipitano sull'area occupata dallo stabilimento ILVA, ha evidenziato che esso *“non recapita le acque raccolte nel primo seno del Mar Piccolo”* e quindi *“non esiste alcuna interferenza, quindi alcun apporto quantitativo e/o qualitativo, tra il reticolo naturale del fiume Galeso e la rete di raccolta delle acque pluviali al servizio dello stabilimento ILVA.”* Tale reticolo rappresenta quindi un'indicazione “potenziale” relativa ad un decorso superficiale presunto delle acque meteoriche dell'area industriale, sulla base dei dati morfologici ed altimetrici (rilievo Lidar ed Ortofoto).



Figura 15

2.4. CARATTERIZZAZIONE IDROGEOLOGICA E CORPI IDRICI SOTTERRANEI (A CURA DEL CNR – IRPI SEDE DI BARI)

L'attività ha riguardato la raccolta e sistematizzazione dei dati ed informazioni ad oggi disponibili in merito a tutte le acque sotterranee che abbiano quale recapito finale, diretto o indiretto, il Mar Piccolo, nonché i relativi acquiferi. È stata condotta: una raccolta dei dati stratigrafici, geofisici, idrogeologici e di qualità delle acque sotterranee derivanti da studi pregressi; un censimento delle sorgenti, subaeree e subacquee mediante attività dirette in campo e sulla base degli esiti delle indagini geofisiche e termiche condotte dal CONISMA e dal CNR IRSA nell'ambito del presente progetto; una razionalizzazione dei dati esistenti sui pozzi privati e pubblici e delle reti di monitoraggio; la ricostruzione dei flussi delle acque sotterranee e, per quanto possibile, delle interazioni tra falda superficiale e profonda; un censimento degli scarichi idrici nel sottosuolo tramite consultazione degli archivi provinciali, con particolare riferimento ai pozzi disperdenti. Le caratteristiche geologiche e idrogeologiche dell'area sono state studiate integrando le conoscenze pregresse a scala regionale con i dati rivenienti da diverse centinaia di perforazione, incluse quelle relative a pozzi per il prelievo di acqua di falda.

Sulla base della letteratura disponibile e delle informazioni derivate dai servizi cartografici regionali, è stata considerata un'area di studio estesa 1.400 km², comprendo l'intero bacino idrogeologico le cui acque sotterranee trovano efflusso nel Mar Piccolo (dominio della circolazione idrica sotterranea, Figura 16).



Figura 16. Individuazione dello spartiacque sotterraneo e del reticolo idrografico.

2.4.1. Complessi e lineamenti idrogeologici

La circolazione idrica sotterranea può essere schematizzata considerando la presenza di due distinte falde idriche sotterranee (Cotecchia et al., 2005; Maggiore e Pagliarulo, 2004; Polemio et al., 2009; Zorzi e Reina, 1962). La prima, più profonda, è rappresentata da una unica falda idrica sotterranea, spesso denominata profonda o carsica, circolante nelle rocce carbonatiche del substrato mesozoico; la seconda è rappresentata da più falde idriche sotterranee, denominate superficiali in quanto rinvenibili a minore profondità e sovrapposte alla precedente. Si tratta di falde idriche sotterranee tra loro in genere non interconnesse e di limitata potenza e potenzialità. Sono presenti in più livelli delle successioni plio-pleistoceniche, che si rinvencono a piccola profondità dal piano campagna e la cui esistenza è dovuta alla presenza a letto di livelli di sedimenti pelitici impermeabili.

A partire dalle conoscenze geologiche, stratigrafiche, geomorfologiche e geo-strutturali, insieme ai dati derivanti dalle perforazioni dei pozzi (oltre 1500), sono stati individuati i complessi idrogeologici dell'area e le loro caratteristiche.

Considerando la continuità spaziale, il tipo e soprattutto il grado di permeabilità, nell'area di studio si distinguono sei complessi idrogeologici, procedendo dal basso: *calcare*, *calcareniti*, *argille*, *sabbie* e *calcareniti*, *depositi alluvionali* e *sabbie* (Figura 17).

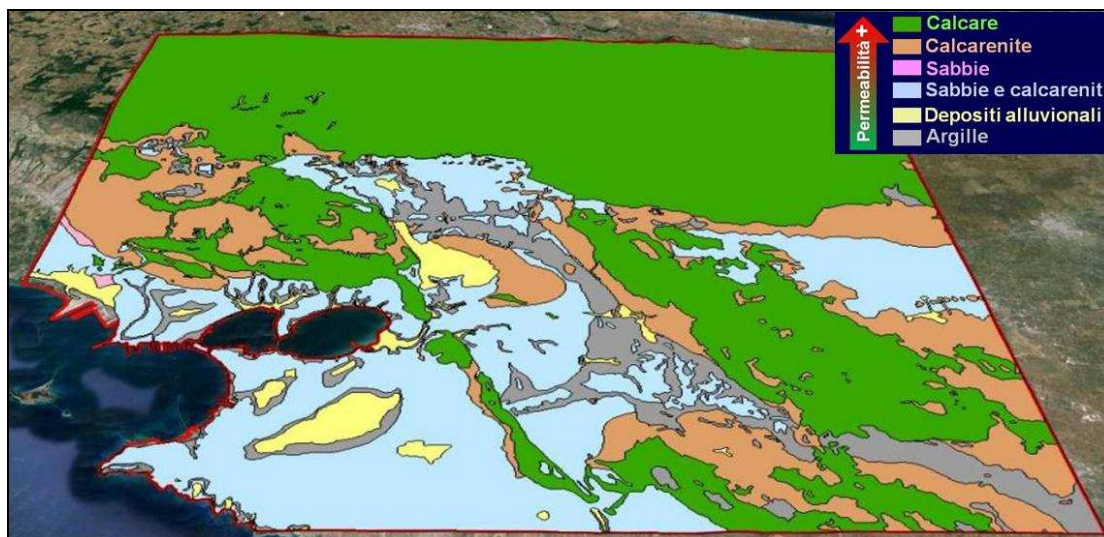


Figura 17. Complessi idrologici e permeabilità relative.

Il complesso idrogeologico del calcare, riferibile al Calcare di Altamura, costituito da una successione di calcari, calcari dolomitici e dolomie, variamente fratturato e con evidenti effetti della dissoluzione carsica, presenta una permeabilità molto variabile, da bassa a alta, per fessurazione e carsismo, e comunque, nella sua interezza, medio-alta. In considerazione della notevole potenza, della considerevole estensione, della conducibilità idraulica e delle proprie capacità di immagazzinamento, tale complesso è sede di un acquifero "profondo" caratterizzato da una buona alimentazione, un abbondante accumulo e trasmissività.

Il complesso idrogeologico della calcarenite, riferibile alle Calcareniti di Gravina, costituito da calcareniti organogene variamente cementate, presenta una permeabilità mista dovuta sia alla porosità di interstizi sia alla fessurazione. I litotipi di questo complesso sono, comunque, poco permeabili (permeabilità da bassa a media) e rivestono un ruolo idrogeologico secondario. Questa formazione, per discontinuità e limitato spessore dei corpi rocciosi, sia perché a contatto con i calcari, si comporta come un "*acquitardo*" nel senso che può contenere le acque sotterranee ma non è in grado di trasmetterle in quantità significative per effetto di un gradiente idraulico normale.

Al tetto della calcarenite si rinviene il complesso idrogeologico delle argille, debolmente marnose, riferibili alle Argille Subappennine. Tale complesso è da considerarsi praticamente impermeabile e comunque con permeabilità da molto bassa a bassa. Il ruolo idrogeologico svolto è quello di un "*acquitcludo*".

I depositi marini terrazzati (sabbie e calcareniti) presentano una permeabilità da bassa a medio-alta, in parte dovuta alla fessurazione. Laddove poggiano sulle argille sono sede di falde idriche superficiali circoscritte ad acquiferi di modesta estensione, data la scarsa continuità laterale che li caratterizza.

Al tetto del calcare, della calcarenite, delle argille o delle sabbie e delle calcareniti, si rinviene, sempre in affioramento, il complesso idrogeologico dei depositi alluvionali, riferibile ai depositi alluvionali e palustri, talvolta torbosi, della sedimentazione attuale e recente. Tale complesso presenta un tipo di permeabilità per porosità interstiziale classificabile a basso grado di permeabilità. Analogamente alle calcareniti, il ruolo svolto è quello di "*acquitardo*".

Infine il complesso idrogeologico delle sabbie, riferibile ai depositi dei sistemi di spiaggia (Dune costiere attuali e recenti), affioranti lungo il litorale ad ovest della città di Taranto, composto in prevalenza da sabbie silicee grigie o giallo-rossastre, talora grossolane ed a stratificazione incrociata, presenta una permeabilità elevata per porosità interstiziale.

Un tale complesso idrogeologico fa sì che si determinino due sistemi di circolazione idrica sotterranea: profonda e superficiale: la prima, più profonda, è rappresentata dalla falda idrica carsica circolante nelle rocce carbonatiche del substrato mesozoico, variamente fratturato; la seconda, assente dove le rocce carbonatiche mesozoiche affiorano, è rappresentata da una falda idrica superficiale che si rinviene a piccola profondità dal piano campagna, spesso frazionata in più livelli, la cui esistenza è dovuta alla presenza di sedimenti poco permeabili al letto della formazione che funge da acquifero. La falda idrica superficiale è per lo più localizzata laddove le sabbie e le calcareniti poggiano sull'acquicludo costituito dalle argille o, secondariamente, dalla locale rilevanza della frazione pelitica nell'ambito dei Depositi marini terrazzati, a cui è riferibile il complesso idrogeologico delle sabbie e calcareniti.

Nell'area di studio si distinguono più acquiferi superficiali le cui falde acquifere non sono in genere in continuità; tali falde sono accumulate dalla scarsa potenza, dalla bassa soggiacenza e dalle limitate potenzialità idrogeologiche. Lungo la costa, la falda carsica emerge in più punti, sia attraverso sorgenti sottomarine che subaeree, queste ultime situate a qualche centinaia di metri dalla riva. Procedendo da ovest verso est, si individuano tre emergenze principali: Galeso, Riso e Battentieri.

Nell'area della sorgente Galeso si distinguono ulteriori sorgenti: Lavandaia, Marangio e Nasisi. Le prime due sono riferibili all'acquifero profondo e sono state interessate negli ultimi decenni da rilevanti modificazioni plano-altimetriche, derivanti dalla realizzazione di infrastrutture stradali e di accesso all'area costiera, che hanno variato le condizioni di efflusso da rendere di scarso interesse il loro monitoraggio quantitativo. La sorgente Nasisi, riferibile a un acquifero superficiale del complesso idrogeologico sabbie e calcareniti, non è risultata accessibile in quanto racchiusa in una proprietà privata per la quale non è stato acquisito l'autorizzazione all'accesso.

Nella parte settentrionale di entrambi i seni del Mar Piccolo si rinvergono, sul fondale marino, le sorgenti sottomarine, denominate "citri". Fra questi, i più importanti sono: il citro Galeso e il citro Citrello, posti nel 1° Seno, il citro Le Copre, il citro Calandrea e il citro Mascione, posti nel 2° seno.

L'acquifero carbonatico riceve la sua alimentazione per ricarica naturale, su un vastissimo territorio che si estende oltre i limiti dell'area di studio e della provincia di Taranto, non soltanto laddove i calcari che lo compongono affiorano direttamente. Infatti, laddove al calcare non affiorante manchi a tetto la presenza delle argille, per il tramite o meno del complesso idrogeologico della calcarenite, l'infiltrazione proveniente dal piano campagna può compiersi in modo alquanto diretto, lungo percorsi a prevalente componente verticale.

Gli acquiferi superficiali in casi molto rari animano alcune modeste sorgenti, due delle quali sono state oggetto di monitoraggio. Gli acquiferi superficiali ricevono la loro alimentazione in prevalenza per ricarica naturale. Per questioni altimetriche e quindi di carico piezometrico, perdite ed efflussi provenienti da questi acquiferi possono potenzialmente alimentare sia acquiferi superficiali altimetricamente sottoposti che la falda idrica profonda, le cui quote piezometriche sono in genere sottoposte a quelle del letto degli acquiferi superficiali, salvo aree molto limitate, prospicienti la costa.

Modello idrogeologico concettuale

I pozzi stratigrafici ubicati nel perimetro dell'area d'interesse, validati e utilizzati, sono 716, posti a profondità compresa tra 5 e 400 m dal piano campagna. È stata successivamente eseguita una rappresentazione numerica mediante elaborazione geostatistica dei risultati, così da desumere le volumetrie di ciascun complesso idrogeologico per l'area in esame (Figura 18).

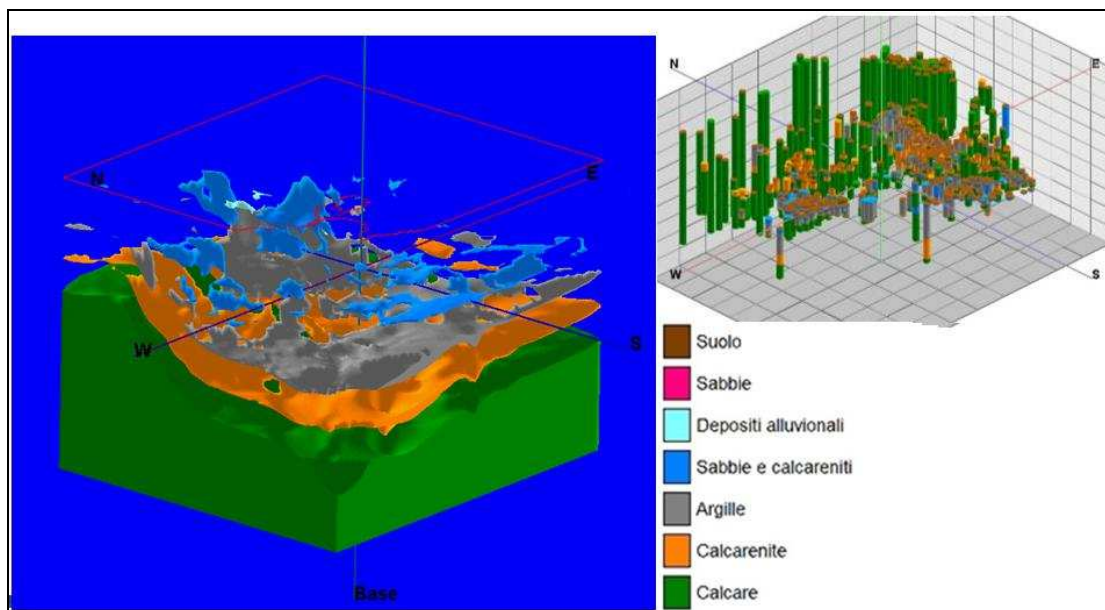


Figura 18. Concettualizzazione idrogeologica a 3D.

La conducibilità idraulica del calcare

Per il complesso idrogeologico del calcare, sulla base dei dati a disposizione, sono state elaborate 886 prove di emungimento per caratterizzare la variabilità spaziale della conducibilità idraulica (capacità di lasciarsi attraversare dall'acqua) dell'acquifero carsico (profondo). I valori sono risultati compresi fra 1,1 e 10-5 m/s, con valore medio pari a $6,3 \cdot 10^{-3}$ m/s. Pur evidenziando un aumento della conducibilità idraulica spostandosi dalle aree più interne verso la costa (da NW verso SE), la permeabilità dei calcari e, conseguentemente, la circolazione delle acque al suo interno è risultata estremamente variabile in ragione dello stato di fratturazione e carsificazione delle rocce, molto variabili tra luogo e luogo nelle tre direzioni principali.

Anche all'interno del complesso dei calcari è emersa l'esistenza di più livelli acquiferi sovrapposti, a causa della frequente presenza di interstrati calcarei poco fratturati, a permeabilità bassa e comunque minore. Nel complesso, l'acquifero, che alimenta le sorgenti che bordano il mar Piccolo e gli stessi "citri", è risultato caratterizzato da rocce dotate di permeabilità medio-alta.

Per quanto attiene la permeabilità degli acquiferi superficiali i dati a disposizione sono pochi e frammentati, tanto da non poter eseguire una rappresentazione areale del parametro. Nel complesso, comunque, le acque di falda superficiale sono accumulate da scarsa potenza, bassa soggiacenza, limitate potenzialità idrogeologiche e non sono in genere in continuità. Sulla base dei dati a disposizione (72 prove di emungimento) si è comunque stimata una conducibilità nell'intervallo $7 \cdot 10^{-2}$ - $1 \cdot 10^{-5}$ m/s.

2.4.2. La superficie piezometrica della falda idrica profonda

L'andamento della superficie piezometrica è abbastanza regolare nelle aree interne mentre assume una morfologia estremamente articolata lungo la fascia costiera, soprattutto nell'intorno del Mar Piccolo. In particolare, i carichi piezometrici passano in modo abbastanza brusco da valori maggiori di 30 m slm, nelle aree più interne, a valori prossimi a 1 m slm, in prossimità della costa. Tale aspetto è legato sia alla complessità geologico-strutturale dell'area sia alla variabilità dei caratteri di permeabilità dell'acquifero carbonatico mesozoico.

Si rilevano diverse direzioni di deflusso idrico che dalle aree più interne, laddove avviene la ricarica dell'acquifero, confluiscono, secondo percorsi più o meno tortuosi, lungo il fronte costiero. In particolare,

l'andamento della superficie piezometrica evidenzia che le direzioni principali dei deflussi sotterranei convergono principalmente verso il Mar piccolo, per l'effetto drenante che le sorgenti costiere (subaeree e sommerse) ivi presenti operano sulla falda, non poco favorito dall'elevata conducibilità idraulica che si riscontra nell'immediato intorno del Mar Piccolo. Ciò conferma che le sorgenti presenti nella fascia costiera restituiscono all'ambiente le acque provenienti da un bacino idrogeologico decisamente esteso (Figura 19).

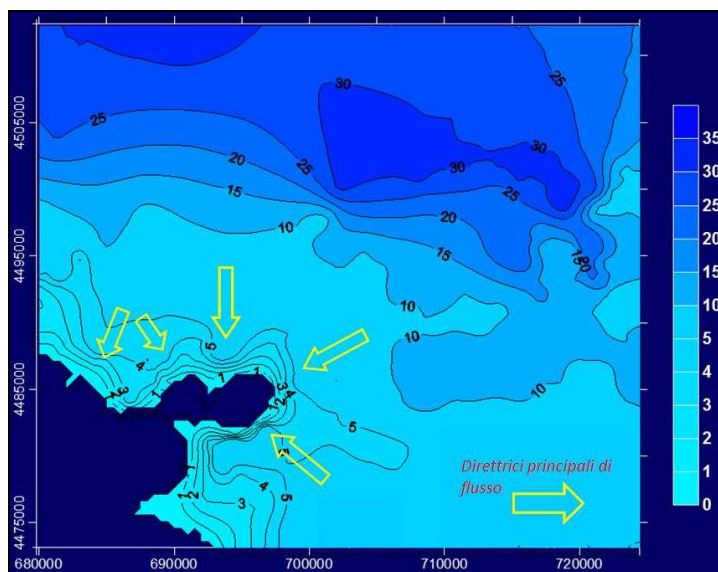


Figura 19

2.4.3. Sorgenti e caratteri chimico-fisici delle acque sotterranee

È stato condotto uno studio storico delle sorgenti e un monitoraggio quali-quantitativo di alcune sorgenti afferenti sia all'acquifero profondo (Galeso, Battentieri e Riso) sia ad acquiferi superficiali (Chianca e Tre Fontane) (Figura 20).

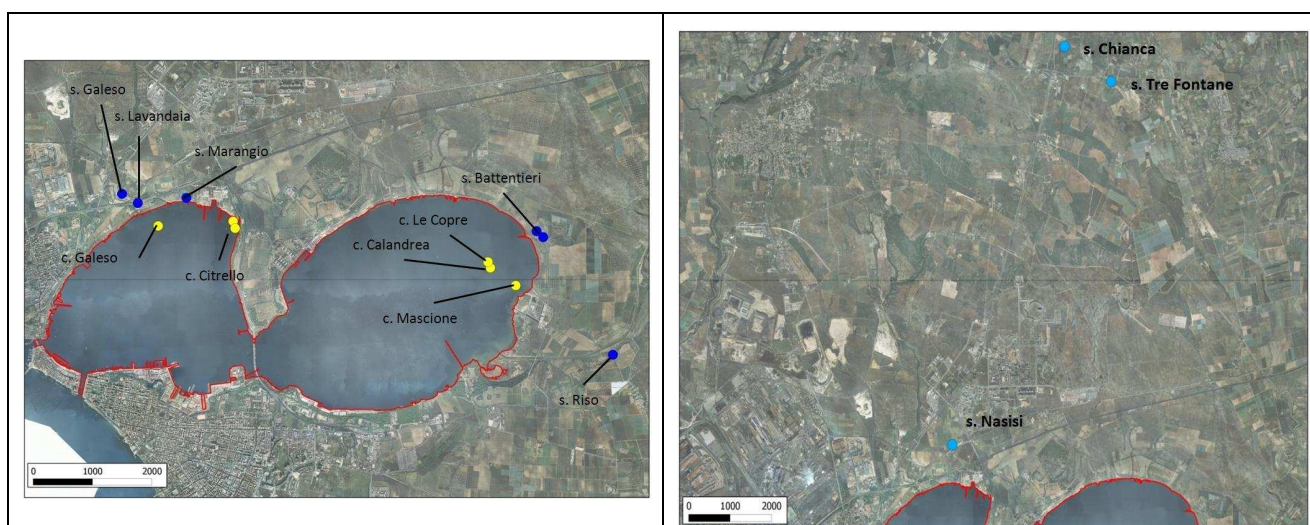


Figura 20. Localizzazione delle sorgenti profonde (figura a destra) e superficiali (figura a sinistra).

Le portate delle sorgenti sono state caratterizzate utilizzando serie storiche di dati, spesso con lacune temporali, che coprono un periodo dal 1926 al 2013 (dal 1926 al 1951 presso il Servizio Idrografico Italiano; Istituto di Geologia Applicata e Geotecnica del Politecnico di Bari per i dati degli anni Ottanta; progetto "Tiziano-Sistema di monitoraggio qualitativo e quantitativo dei corpi idrici sotterranei della Regione Puglia" per i dati dal 2007 al 2011; i dati del 2013 sono dovuti alle misure direttamente effettuate dall'IRPI).

La Tabella 2 riporta i dati delle principali statistiche descrittive calcolate dalle serie storiche delle portate di tutte le sorgenti studiate.

Valore portata (m ³ /s)	Battentieri	Galeso	Riso	Chianca	Lavandaia	Tre Fontane	Marangio	Citro Galeso
Media	0,2	0,487	0,1	0,002	0,03	0,001	0,01	0,704
s.q.m.	0,042	0,064	0,023	0,001	0,009	0,001	0,001	0,117
Inizio oss.	1926	1926	1926	1927	1926	1927	1948	1988
Fine oss.	2013	2013	2013	2013	1951	2013	1951	1989
N. Valori	56	82	43	3	45	3	3	5

Tabella 2

La più significativa tra le sorgenti censite, in termini essenzialmente quantitativi, è la sorgente Galeso, la cui portata massima nel corso del 2013 è stata pari a 0,35 m³/s. Si tratta di una vasta area sorgiva costituita da numerose polle che scaturiscono in una zona topograficamente depressa, estesa alcune migliaia di metri quadrati, ricoperta in gran parte da vegetazione palustre, contornata da un muretto, situata tra la provinciale Taranto-Martina Franca e la ferrovia Taranto-Brindisi, alla quota di 4,50 m slm. Tali polle danno luogo a un corso d'acqua, lungo circa 900 m, che sfocia nel Mar Piccolo. Il canale di efflusso, a sezione trapezoidale, largo in sommità 8 m, caratterizzato da un rivestimento cementizio, raggiunge, dopo una trentina di metri, una passerella in cemento munita di tre paratoie, costruita in corrispondenza dell'attraversamento della tubazione dell'Acquedotto Pugliese. Dopo il ponte della ferrovia Taranto-Brindisi, il canale in terra si allarga notevolmente, proseguendo, per circa 600 m, fino al Mare Piccolo. La sorgente Galeso è collegata idraulicamente all'omonimo "citro".

La sorgente Battentieri si colloca lungo la fascia costiera orientale del Mar Piccolo, lungo la costa del seno di Levante, in un avvallamento del terreno situato a circa 300 m di distanza dalla riva. È costituita da numerose polle sparse in una vasta superficie ricoperta da fitta vegetazione di canne ed erbe palustri, che impediscono l'accesso alle polle stesse. All'altezza di un vecchio fabbricato anticamente adibito a convento, le acque sorgive convergono in un breve canale dal quale si diparte una derivazione che attraversa i ruderi di un ex mulino, da qui, dopo essersi nuovamente riunite, si riversano dopo pochi metri su altra limitata superficie palustre, dando poi origine al canale emissario (Cervaro) che sfocia a mare. La Sorgente Battentieri potrebbe essere collegata idraulicamente col citro "Le Copre". Il calcolo della portata per il periodo di osservazione ha dato un valore medio di circa 0,2 m³/s, mentre nel 2013 il massimo valore osservato è stato 0,17 m³/s, a fronte di una media di 0,14 m³/s.

La sorgente Riso è costituita da molte piccole polle scaturenti da una superficie esagonale di circa 1.400 m², contornata da un muretto formante vasca di raccolta delle acque, in massima parte ricoperta da vegetazione palustre. La vasca è ubicata in prossimità della stradella denominata Mulino, a circa 2,5 km dal bivio della strada statale Taranto-S. Giorgio Jonico. Attraverso un varco, in corrispondenza dello spigolo Sud della recinzione, si immettono altre acque, la cui portata è di modesta entità, convogliate da un piccolo fosso in terra, lungo un centinaio di metri, alimentato verso monte da affioramenti freatici. La portata media per tutto il periodo di osservazione è di circa 0,1 m³/s mentre la massima osservata durante il

monitoraggio IRPI è di $0,035 \text{ m}^3/\text{s}$. Le acque della sorgente defluiscono attraverso un canale in terra, in un piccolo canale di drenaggio, che a sua volta si immette nel canale d'Aiedda, sfociante nel Mar Piccolo.

In Tabella 3 sono riportate le principali caratteristiche chimico-fisiche delle acque delle sorgenti monitorate dall'IRPI. I dati mostrano una modesta variabilità per le sorgenti appartenenti all'acquifero profondo, a differenza delle sorgenti superficiali, notevolmente influenzate dalle precipitazioni meteoriche.

Sorgente Galeso						
Data	Temp (°C)	C.E. (mS/cm)	Salinità (g/l)	pH	O.D. (mg/l)	ORP (mV)
10/09/2013	18,71	3,68	1,92	7,09	3,25	250
17/12/2013	18,78	3,77	1,97	7,32	3,36	169
Sorgente Battentieri						
Data	Temp (°C)	C.E. (mS/cm)	Salinità (g/l)	pH	O.D. (mg/l)	ORP (mV)
12/09/2013	17,77	5,15	2,75	7,42	7,81	82
18/12/2013	17,11	5,31	2,84	7,57	5,81	101
Sorgente Riso						
Data	Temp (°C)	C.E. (mS/cm)	Salinità (g/l)	pH	O.D. (mg/l)	ORP (mV)
12/09/2013	17,43	3,86	2,02	7,62	12,72	75
18/12/2013	16,53	3,87	2,02	7,64	4,47	83
Sorgente Tre Fontane						
Data	Temp (°C)	C.E. (mS/cm)	Salinità (g/l)	pH	O.D. (mg/l)	ORP (mV)
17/12/2013	13,75	0,776	0,38	7,95	8,38	102
Sorgente Chianca						
Data	Temp (°C)	C.E. (mS/cm)	Salinità (g/l)	pH	O.D. (mg/l)	ORP (mV)
10/09/2013	18,1	0,85	0,41	7,4	9,46	221
17/12/2013	17,47	0,806	0,39	7,51	8,45	111

Tabella 3

Durante i rilievi sulle sorgenti sono stati prelevati anche alcuni campioni di acqua al fine di valutare alcune caratteristiche geochimiche delle acque sotterranee, sia per l'acquifero profondo (sorgente Galeso, sorgente Battentieri e sorgente Riso) sia per quello superficiale (sorgente Tre Fontane e sorgente Chianca, situate a nord del Mar Piccolo). Al momento del prelievo di ciascun campione sono stati misurati in sito i parametri chimico-fisici principali: temperatura, conducibilità elettrica specifica, pH, ossigeno disciolto e potenziale di ossido-riduzione. Dal campione è stata prelevata un'aliquota di acqua trattata con acido nitrico (per evitare la precipitazione dei carbonati e degli idrossidi di calcio e magnesio), per la determinazione dei cationi, ed un'aliquota non trattata per la determinazione degli anioni. I cationi (Li^+ , Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) e gli anioni (F^- , Cl^- , Br^- , NO_3^- , SO_4^{2-}) sono stati determinati con il metodo della cromatografia ionica. Lo ione bicarbonato (HCO_3^{2-}) è stato determinato mediante titolazione volumetrica con HCl 0.1N. I risultati delle analisi espressi in mg/l sono riportate nella successiva Tabella 4.

N.	Sorgente	Li ⁺	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Sr ²⁺	F ⁻	Cl ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	HCO ₃ ²⁻	SO ₄ ²⁻
1	Chianca	0,00	36,6	1,43	6,88	127,9	0,10	1,62	83,97	0,32	63,9	244	69,3
2	Tre Fontane	0,00	41,7	1,37	8,50	129,2	0,46	2,01	86,80	0,35	40,6	299	75,4
3	Galeso	0,03	539,4	17,64	87,1	117,3		3,68	1060,54	4,22	16,8	354	160,6
4	Battentieri	0,04	839,3	30,13	114,7	141,7	1,71	3,67	1638,74	5,99	13,7	372	222,6
5	Riso	0,02	575,9	22,03	86,4	118,9		2,89	1068,65	4,20	22,5	366	156,2
6	Mar Piccolo	0,15	11160	337,1	1297	408,7			21024	69,4		171	2458

Tabella 4

Nei campioni d'acqua prelevati in corrispondenza delle sorgenti costiere (sorgente Galeso, sorgente Battentieri e sorgente Riso) si evidenzia la prevalenza degli ioni alcalini (Na⁺ e K⁺) su quelli alcalino terrosi (Ca²⁺ e Mg²⁺) e la prevalenza dello ione cloruro sugli ioni bicarbonato e solfato. Le acque presentano quindi una prevalenza degli ioni di origine marina (Na⁺, K⁺ e Cl⁻) rispetto agli ioni di origine continentale (Ca²⁺, Mg²⁺, HCO₃³⁻). Tali campioni sono caratterizzati da valori di conducibilità elettrica specifica piuttosto elevati. L'acqua di falda degli acquiferi carbonatici è caratterizzata generalmente da una prevalenza degli ioni calcio e bicarbonato, derivanti dalla dissoluzione dei minerali calcite (maggiormente solubili) e dolomite (meno solubili). Poiché i campioni analizzati delle sorgenti costiere risultando sottosaturi rispetto alla calcite e sovrassaturi rispetto alla dolomite, si desume che tali acque possiedono le caratteristiche chimiche di un'acqua di falda contaminata da acque marine di intrusione continentale. Dall'analisi dei tracciati geochemici riportati nel diagramma di Shoeller (Figura 21) si distinguono tre gruppi di acque:

- al primo gruppo fanno parte le acque delle sorgenti localizzate lungo la costa del Mar Piccolo;
- al secondo gruppo le acque dell'acquifero profondo localizzati nella zona del Mar Piccolo;
- al terzo gruppo le acque dell'acquifero superficiale campionate in corrispondenza delle sorgenti Chianca e Tre Fontane.

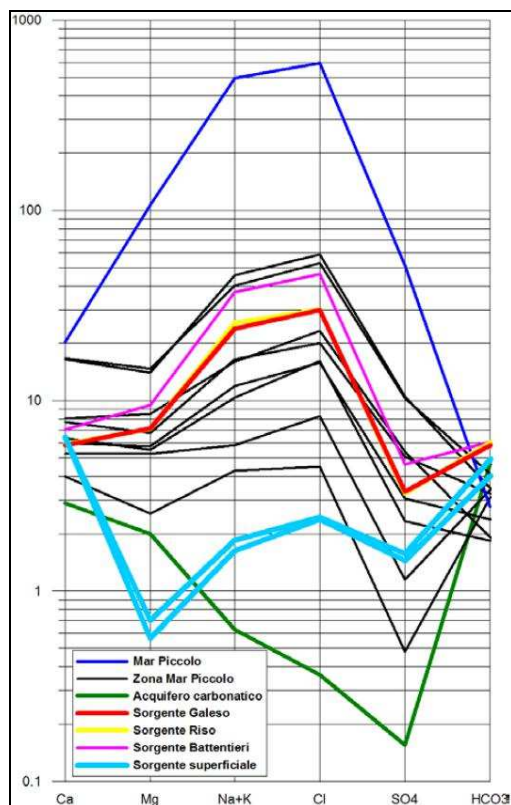


Figura 21. Diagramma di Shoeller.

2.4.4. La falda idrica superficiale e le aree a destinazione industriale

Focalizzando l'attenzione nella porzione di territorio sede delle attività produttive, industriali e artigianali, di Taranto, le isopiezie della falda idrica profonda, in particolare quelle con quota minore di 4 m s.l.m., individuano un chiaro spartiacque sotterraneo, con asse SSW-NNE (quasi a lambire P. Rondinella) e che divide il flusso idrico sotterraneo diretto verso il Mar Piccolo da quello diretto verso il Mar Grande (Figura 22).

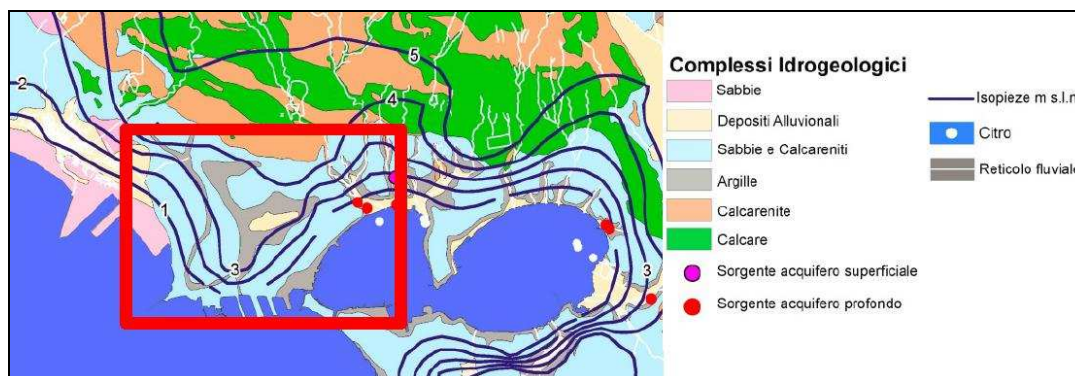


Figura 22

Tale andamento era stato evidenziato anche nello Studio di fattibilità relativo alla messa in sicurezza e bonifica della falda superficiale del SIN Taranto, realizzato nel 2011 dalla Sogesid S.p.A., dove la ricostruzione del "campo di esistenza" dell'acquifero superficiale al di sotto dell'area industriale, a partire dai dati di caratterizzazione disponibili, aveva mostrato come l'Unità delle Argille del Bradano, alla base dell'acquifero, abbia un alto verso monte e nella zona centrale dell'area e, conseguentemente, un approfondimento a ridosso della linea SW in prossimità del Mar Grande e ad est verso il Quartiere Tamburi ed il 1° seno del Mar Piccolo (Figura 23).

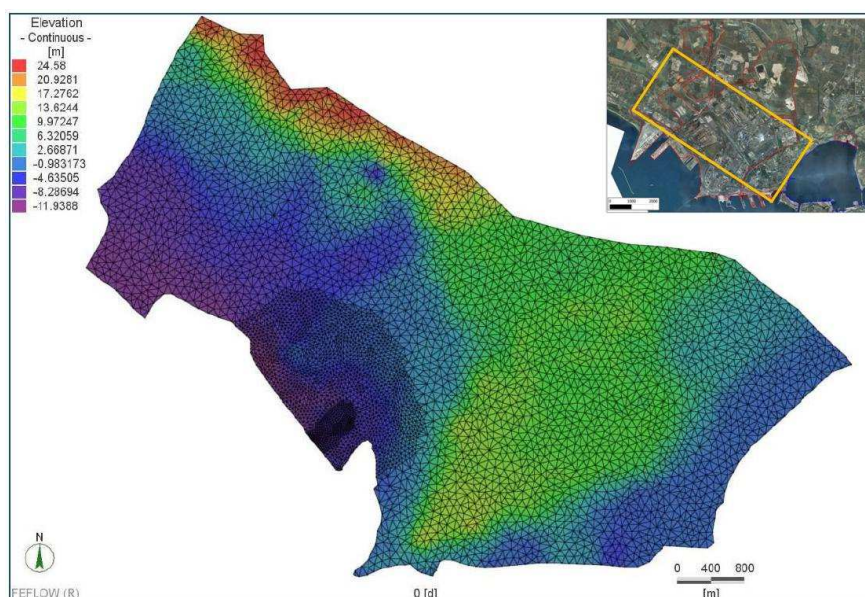


Figura 23. Quota di base acquifero superficiale (tetto delle Argille).

La falda idrica superficiale, nell'area industriale, è collocata principalmente nel complesso idrogeologico delle sabbie e calcareniti, la cui continuità spaziale è interrotta da diversi fattori: affioramento delle argille; presenza di "cigli di scarpate" (lineazioni geomorfologiche che naturalmente dividono, mediante terrazzi di origine marina, il complesso idrogeologico in più corpi acquiferi, non necessariamente in continuità idraulica); interventi antropici quali, ad esempio, l'apertura di cave per l'estrazione di calcare o di argilla, la realizzazione di scavi per l'edificazione di strutture produttive (manufatti impermeabili al flusso idrico sotterraneo), la realizzazione di trincee per le infrastrutture lineari di trasporto e la movimentazione delle materie prime e dei prodotti. Tutti questi fattori tendono a favorire la venuta a giorno delle acque sotterranee o l'efflusso in altri corpi idrici sotterranei, ostacolando il loro flusso verso il livello base della circolazione idrica, rappresentato dal livello del mare.

Un esempio in tal senso è rappresentato dalla ex cava di argilla, in seguito utilizzata quale discarica, posta nel perimetro industriale della Cementir (Figura 24-A). In tale area l'acquifero superficiale ha potenza modestissima, di pochi metri. La falda idrica superficiale, di natura freatica, ha carico piezometrico maggiore di oltre dieci metri rispetto a quello della falda idrica profonda. Allo stesso tempo, la profonda trincea ferroviaria, che limita a SE la ex cava, si spinge fino alle argille, tagliando del tutto l'acquifero superficiale e quindi impedendo che il flusso idrico della falda superficiale si possa spingere oltre la trincea medesima. Il tracciato di tale trincea ferroviaria segue il tracciato ottenibile congiungendo i 4 piezometri anidri. Si noti che tale trincea si estende per diverse centinaia di metri fin quasi a raggiungere il mare, lungo un tracciato ad andamento grossomodo NNE-SSE (Figura 24-B).

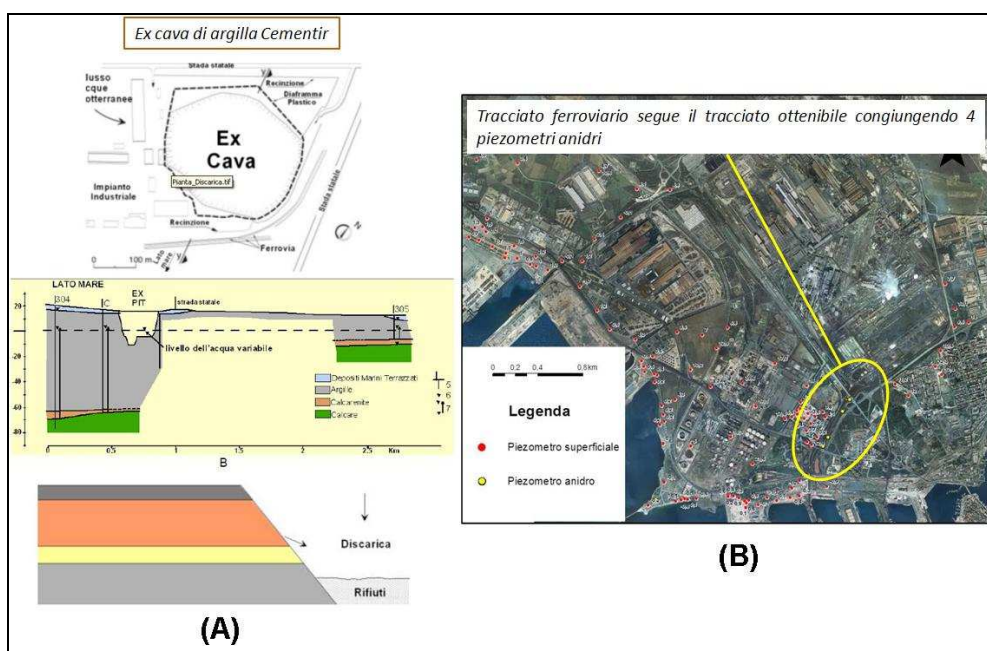


Figura 24

Tali osservazioni dimostrano che l'individuazione accurata dei percorsi della falda idrica dell'acquifero superficiale nell'area industriale di Taranto richiede una densissima e accurata molteplicità di informazioni, inerenti la stratigrafia, la morfologia, l'altimetria e la conducibilità idraulica. Disponendo di tali dati non sarebbe complesso ricostruire i percorsi idrici a monte e a valle di ciascun punto potenziale di pericolo, sia essa una discarica, controllata o no, o qualsiasi altra sorgente di inquinanti.

Si pone, quindi, in evidenza che le informazioni ad oggi disponibili forniscono delle indicazioni qualitativamente chiare circa la modalità di circolazione idrica sotterranea della falda superficiale e dei relativi percorsi. Allo stesso tempo, il passaggio alla conoscenza puntuale e accurata delle suddette



caratteristiche potrebbe conseguirsi dall'acquisizione e dall'analisi unitaria della grande quantità di dati già nella disponibilità di terzi e/o in corso di acquisizione nell'area industriale, nella zona Tamburi e, più in generale, in un congruo intorno del Mar Piccolo.

Un primo tentativo di modellizzare numericamente il flusso sotterraneo della falda superficiale è stato realizzato sempre nell'ambito dello Studio di fattibilità sopra citato e di cui si farà cenno, riportandone i principali risultati evidenziati, nella sezione di questo documento dedicato alla valutazione delle "vie di trasporto" potenziale della contaminazione verso il 1° seno del Mar Piccolo.

2.4.5. *Gli scarichi idrici nel sottosuolo*

A causa della copiosa, non sistematizzata e quasi esclusivamente in formato cartaceo documentazione relativa alle autorizzazione agli scarichi, presente negli archivi della Provincia di Taranto, al momento è stato condotto uno screening relativo esclusivamente a studi pregressi condotti dal CNR-IRSA per la redazione di strumenti di pianificazione idrica a livello regionale. Da tale analisi è emerso che gli scarichi idrici autorizzati nella provincia di Taranto, sono stati 170 (informazioni disponibili: titolare dello scarico, comune, ubicazione impianto, tipo insediamento, portata e recapito finale), la maggior parte relativi a immissioni più o meno dirette nel sottosuolo e quindi tali da raggiungere agevolmente la falda idrica sotterranea.

2.5. MODELLO DI CIRCOLAZIONE DELLE ACQUE DEL MAR PICCOLO (A CURA DEL POLITECNICO DI BARI – DICATECH)

È stata realizzata una modellazione della circolazione marina mediante il modello di simulazione 3D MIKE 3 del DHI (*Danish Hydraulic Institute*) in versione FM - *Flexible Mesh* (equazioni di Navier-Stokes, di continuità, di conservazione della temperatura e salinità, sull'equazione di stato) per l'intero bacino del Mar Piccolo. Sebbene tale bacino possa essere inteso come un'area interna relativamente chiusa, collegata al Mar Grande mediante i soli Canali Navigabile e Porta Napoli, al fine di valutare anche l'influenza della circolazione più esterna sul bacino stesso, si è deciso di estendere il dominio di indagine (la così detta *mesh* o griglia di calcolo) ben oltre la zona di maggiore interesse. In questo modo le condizioni al contorno sono state imposte su un confine aperto distante dal Mar Piccolo, laddove si dispone dei dati da usare in input ed in modo che le possibili alterazioni della circolazione lungo tale confine si ripercuotano sul Mar Piccolo stesso.

Al fine di disporre di una risoluzione fine nell'area di interesse, in modo da poter visualizzare anche circolazioni locali circoscritte, per esempio in prossimità dell'idrovora dell'ILVA, si è utilizzata per la discretizzazione del dominio una *mesh* a maglie larghe nella regione di acque profonde, opportunamente infittita sul Mar Grande ed ancora di più sul Mar Piccolo. I nodi di tale *mesh* rappresentano i punti di calcolo del modello. La discretizzazione verticale nel modello viene effettuata secondo i cosiddetti *layers* sigma, ovvero *layers* che seguono l'andamento del terreno, in modo da ottenere lungo ogni verticale un numero di punti di calcolo costante.

2.5.1. Elaborazioni statistiche ed integrazione con le misure di campo

Dall'analisi dei dati anemometrici disponibili (ENAV 1951-1967 e della campagna di acquisizione del DICATECH del 2007) e dall'elaborazione dei dati ondametrici ricavabili attraverso l'applicazione del modello SPM in Figura 25 si riportano i modelli derivati per le direzione dei venti e delle mareggiate prevalenti per il paraggio di Taranto. Dalla loro valutazione emerge come ci siano due situazioni medie annue riconducibili al periodo invernale ed a quello estivo. Per quanto riguarda la direzione prevalente dei venti, in inverno si osserva una direzione prevalente dal quadrante NNO ed un'intensità variabile tra 11 e 17 nodo, mentre in estate la direzione prevalente diventa dal quadrante OSO con intensità tra 11 e 17 nodi. Per quanto riguarda le caratteristiche ondametriche medie, si osserva in inverno una maggiore frequenza da SSE, con una mareggiata equivalente per l'intero paraggio con altezza 2.87 m, periodo 6.73 s e direzione di provenienza 147°, mentre in estate una frequenza (media) maggiore da SSE, con una mareggiata equivalente per l'intero paraggio con le seguenti caratteristiche: altezza 1.18m, periodo 4.26s, direzione di provenienza 151°.

Le operazioni di misura in campo sono state condotte dal gruppo di ricerca del DICATECH nell'ambito di una campagna di monitoraggio del Mar Piccolo, realizzata in un periodo precedente a quello di riferimento della Convenzione.

Per effettuare i rilievi correntometrici si è utilizzato un sistema di misura basato sul VM-ADCP (*Vessel Mounted Acoustic Doppler Current Profiler*) della NORTEK, accoppiato ad un DGPS (*Differential Global Position System*), in grado di stimare la posizione della barca con una buona accuratezza (nota tale posizione istante per istante si può determinare la velocità assoluta della corrente) e di una girobussola elettronica per conoscere la direzione della corrente. Contemporaneamente alle misure di velocità, si sono condotte misure di temperatura e salinità lungo la colonna d'acqua attraverso una sonda CTD della IDRONAUT. A completamento, si sono misurati anche i dati di vento e di temperatura dell'aria mediante, rispettivamente, un anemometro a mulinello della COMETEO ed un termometro della Delta OHM.

In Figura 26 si riportano le stazioni investigate, specificando per ciascuna l'orario di acquisizione e le informazioni relative al vento ed alla temperatura registrate in situ.

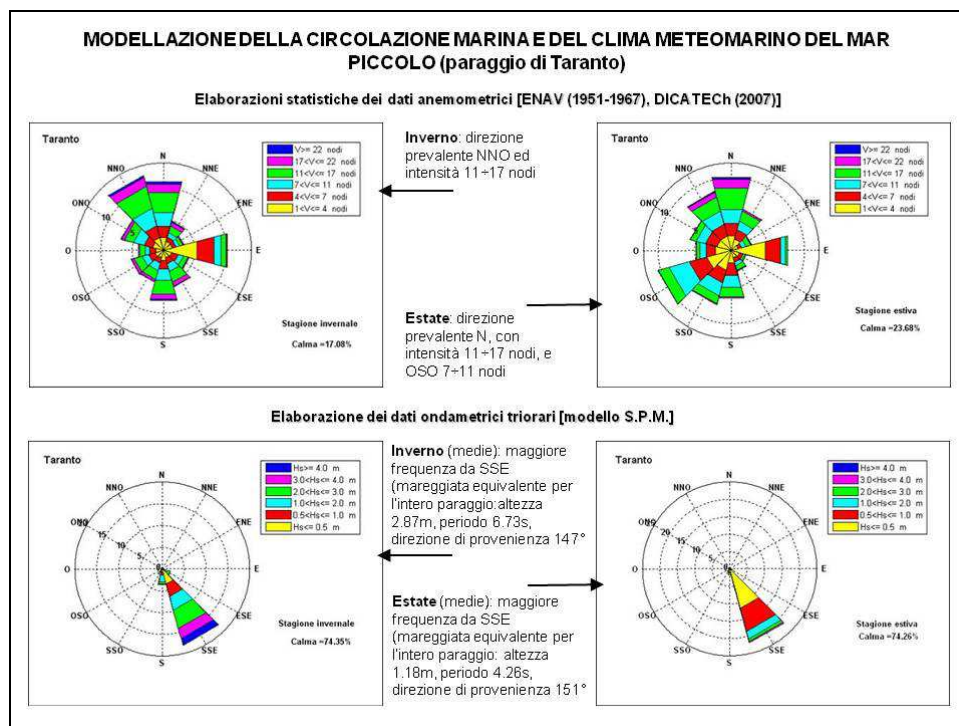


Figura 25

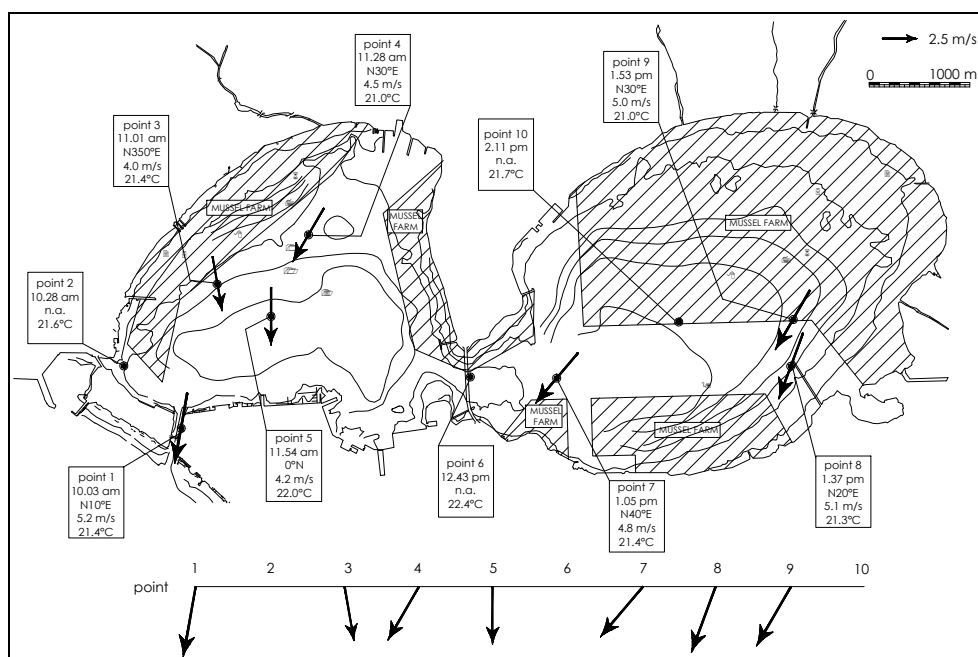


Figura 26. Stazioni di misura con indicazione dell'orario di acquisizione, della velocità e direzione del vento registrato e della temperatura dell'aria.

Dall'osservazione delle velocità misurate in corrispondenza delle varie stazioni alle profondità indagate si rileva l'esistenza di un flusso entrante nel Mar Piccolo attraverso i due canali di comunicazione con il Mar Grande, che gradualmente interessa anche il 2° Seno. Le velocità verticali sono generalmente inferiori di un ordine di grandezza rispetto a quelle orizzontali, pertanto non si rileva alcuna significativa circolazione verticale. Per ciò che riguarda la salinità è emersa, a tutte le profondità, la presenza di valori massimi in

corrispondenza dei canali d'accesso, specialmente del Canale Navigabile, mentre si osserva una riduzione spostandosi nella parte più a nord del 1° Seno e verso il 2° Seno. Inoltre si rileva che la salinità è crescente con la profondità. L'andamento della temperatura mostra valori minimi in prossimità dei canali e crescenti nella regione più interna del bacino. Si nota in generale che ad un aumento di salinità corrisponde una riduzione di temperatura e viceversa.

Implementazione e calibrazione del modello

Per eseguire le simulazioni numeriche si è impiegato il software MIKE 3FM costituito dal modulo centrale idrodinamico (HD) accoppiato con moduli per il calcolo del moto ondoso (SW) e del *particle tracking*. La calibrazione è avvenuta considerando misure di campo ed impiegando i seguenti parametri: coefficiente di *drag* del vento (CD), la scabrezza del fondo (z_0), testando sub-modelli per la chiusura delle equazioni di turbolenza (CS). È stata presa in considerazione anche la batimetria aggiornata del Mar Piccolo, prevista dal Programma di Lavoro in capo ad ARPA. La scelta della griglia (*mesh*) di calcolo è stata fatta prendendo in considerazione un'area molto più vasta del Mar Piccolo ed infittendola via via procedendo dal largo verso i due seni (Figura 27), migliorando, in questo modo l'accuratezza del dato elaborato.

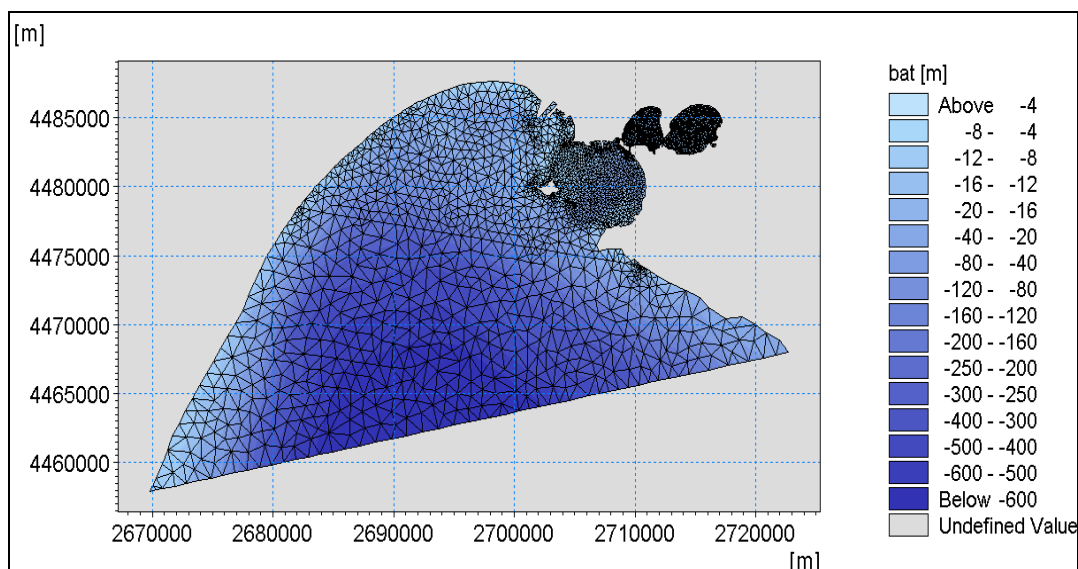


Figura 27

Un aspetto da valutare attentamente, durante la fase di taratura del modello, è la scelta delle azioni forzanti da inserire in input. Considerando che sono numerosi i fattori che possono influenzare la circolazione marina, in particolare nel caso in esame, trattandosi di un'area fortemente antropizzata, si è deciso di partire selezionando alcune forzanti principali, per poi aggiungerne gradualmente altre. In questo modo si fissa una sorta di gerarchia di azioni forzanti e si osserva come la circolazione venga modificata per effetto dei vari contributi.

Le prime simulazioni sono state eseguite in ambiente barotropico, ovvero senza valutare l'influenza di gradienti termici e salini. Inoltre si è dapprima simulata l'idrodinamica per effetto del vento e della marea, che sono ritenuti tra i principali fattori forzanti, successivamente si sono imposti i contributi dei principali afflussi, quali corsi d'acqua fluviali e citri e il deflusso verso l'idrovora a servizio dell'ILVA. Successivamente si è inserita un'ulteriore forzante, ovvero il moto ondoso. Il passo successivo è stato quello di prendere in considerazione anche le variazioni di temperatura e salinità.

Nell'implementazione del modello si è proceduto all'interpolazione dei dati di batimetria disponibili sui nodi della *mesh* individuata.

Per ogni simulazione la durata imposta è stata di 4 giorni, avendo rilevato in precedenti lavori che questa durata consente il superamento del transitorio ed il raggiungimento di una condizione pressoché stazionaria in corrispondenza dell'ultimo giorno di simulazione. In tal modo, nel quarto giorno, si sono effettuati i confronti tra risultati del modello e misure.

Per validare il modello sono state eseguite anche delle prove-test di calibrazione così definite:

- Azioni vento e marea semplificate (test 1÷6): ambiente barotropico; vento omogeneo e stazionario, intensità e direzione pari a medie dei valori registrati (5m/s e N22E); marea su confine aperto (onda sinusoidale, ampiezza 0.09 m e periodo 12 ore); inserimento graduale dei prelievi dell'ILVA (medie registrazioni triennali: $Q \sim 37 \text{ m}^3/\text{s}$) e degli input da canali e citri (Umgiesser et al., 2004). Per questi sei casi il *best matching* lo si è avuto con il test 6: sovrapposizione vettori misurati (in rosso) e da modello (in blu) alla quota $z=-4\text{m}$ (Figura 28).
- Azioni vento e marea misurate (test 7): con identiche condizioni in input del test 6, eccetto un vento e marea variabili nel tempo (valori registrati Idromare ISPRA)
- Azioni vento, marea e moto ondoso misurate (test 8): stesse condizioni in input test 7, aggiungendo effetto moto ondoso (*radiation stresses* ottenute con MIKE 21SW) con valori del clima meteomarinario del periodo di misura (onda dir=N262E, $H_s=1.8\text{m}$, $T_p=6.3\text{s}$); dati di vento dalla stazione ENAV di Ginosa Marina e dati di onda della boa ondometrica di Crotone (metodo della trasposizione geografica). Il test 8 rispetto al test 7 migliora soprattutto per le direzioni (Figura 29).

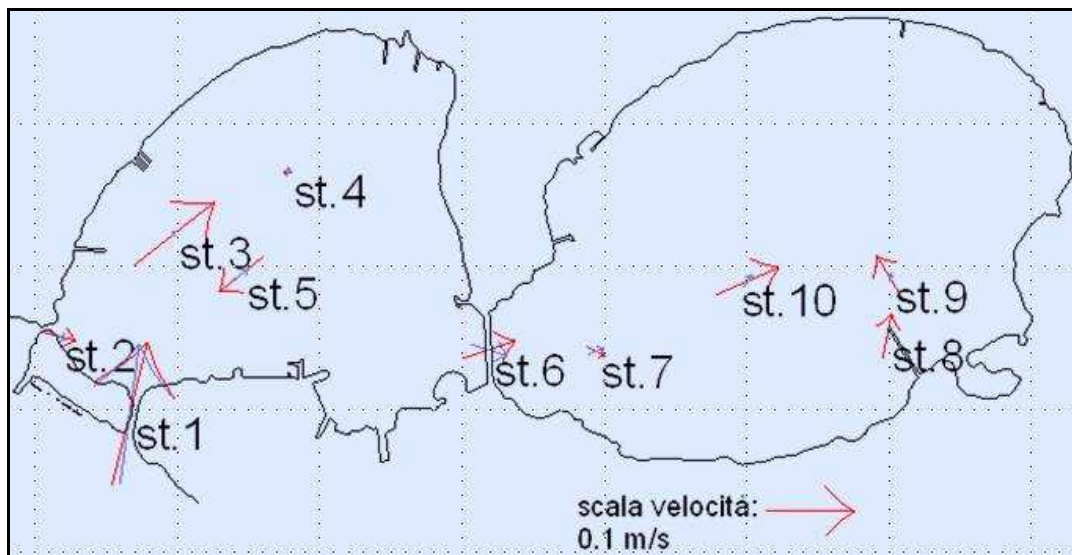


Figura 28. Sovrapposizione vettori misurati (in rosso) e da modello (in blu) per il test 6.

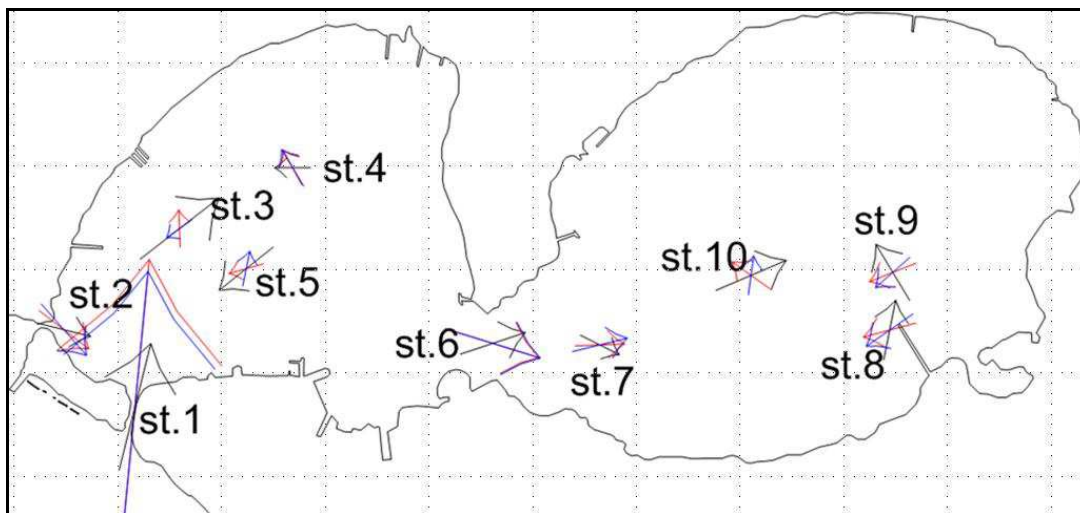


Figura 29. Sovrapposizione dei vettori in blu del test 7, dei vettori in rosso per il test 8, mentre in nero sono indicati i vettori misurati.

Simulazioni rappresentative di condizioni medie stagionali

Una volta calibrato il modello ed individuate le azioni forzanti più significative, che maggiormente influenzano la struttura idrodinamica nel bacino, il passo successivo consiste nella rappresentazione di due circolazioni stagionali del Mar Piccolo. Si deve disporre, pertanto, di una circolazione idrodinamica di base che possa ritenersi rappresentativa di una situazione tipica e realistica. Per questo motivo si sono prodotte due circolazioni medie stagionali, rispettivamente invernale ed estiva, utilizzando come input del modello le principali azioni forzanti, secondo quanto già osservato nelle prove precedenti, ed utilizzando i valori dei parametri di calibrazione individuati appunto nelle simulazioni di taratura e validazione.

In particolare, si sono imposte come forzanti le condizioni di vento e moto ondoso stagionali ricavati dall'analisi statistica. In riferimento invece alle condizioni di marea, si è fatto riferimento sia ai valori di marea astronomica, disponibili in un apposito database di cui il software MIKE è provvisto, sia alle serie storiche registrate in situ e disponibili nel database dell'ISPRA-Idromare, con particolare riguardo all'ultimo triennio disponibile. Si sono conseguentemente stimati i valori medi di ampiezza e periodo della marea da utilizzare e si è imposto un andamento sinusoidale del livello sul confine aperto del dominio. Le simulazioni sono state riprodotte su un arco temporale di 15 giorni.

I risultati di ogni simulazione sono illustrati nel modo seguente: le mappe orizzontali di corrente vengono plottate per due quote di riferimento, superficiale $z=-2\text{m}$ ed intermedia $z=-5\text{m}$ al variare del tempo.

Soltanto per il 2° giorno di simulazione e per la sola quota $z=-2$, si mostrano gli andamenti ad intervalli triorari nell'arco delle 24 ore, evidenziando le principali caratteristiche della corrente. Riconstrandolo il raggiungimento di una situazione stazionaria e la periodicità nelle strutture idrodinamiche, per brevità, tali mappe vengono poi rappresentate alle due quote per il 3°, 9° e 15° giorno di simulazione ad intervalli triorari, con riferimento ad un solo ciclo completo di marea, cioè per un arco di tempo pari a 12 ore.

Per completezza, al fine di valutare come la circolazione interessa il fondo, è stata definita anche una mappa orizzontale di corrente alla quota $z=-10\text{m}$, con riferimento solo all'ultimo giorno della simulazione, ovvero il 15° giorno, nell'arco di un ciclo di marea. Le descrizioni complete delle due prove sono riportate dettagliatamente nella relazione finale prodotta dal DICATECh (vedi Allegato 5).

Simulazioni stagionali

Per la simulazione invernale si sono utilizzati in input i seguenti parametri: campo di vento da NNO pari a 7 m/s, onda 147° NE, con $H_s=2.87\text{m}$, $T_p=6.73\text{s}$ al largo, ed una marea sinusoidale con ampiezza 0.15m e periodo 12 ore. Per la simulazione estiva si sono utilizzati in input i seguenti parametri: campo di vento da

vento da OSO pari a 3 m/s, onda 151° NE, con $H_s=1.18\text{m}$ e $T_p=4.26\text{s}$ al largo, ed una marea sinusoidale con ampiezza 0.10m e periodo 12 ore.

Nelle figure, dalla Figura 30 alla Figura 35, si riportano, a scopo di esempio, alcune delle mappe di velocità orizzontale riferite alla circolazione delle acque nel Mar Piccolo e definite nello studio in oggetto.

I risultati della simulazione in Inverno evidenziano innanzi tutto che l'azione della marea imposta sul confine aperto raggiunge il Mar Piccolo con un ritardo di circa tre ore. Inoltre si osserva il carattere ciclico dei flussi, in accordo con il ciclo di marea imposto.

In Figura 30 si mostra l'andamento della circolazione orizzontale nel 3° giorno per una profondità di -2 m (superficiale) di una *run* plottata con riferimento ad un ciclo intero di marea, alle ore 09:00 per la condizione "dopo bassa marea" (DBM), alle ore 12:00 per la "alta marea" (AM), alle ore 15:00 per la "dopo alta marea" (DAM) e infine alle ore 18:00 per la "bassa marea" (BM). In linea generale si osservano due flussi in ingresso nel Mar Piccolo che danno origine ad un primo ramo di corrente costiera che interessa l'area dell'Arsenale Militare e ad un secondo ramo più debole che si dirige verso l'idrovora e contribuisce ad alimentarla formando un piccolo vortice antiorario. Dall'idrovora si dipartono in direzioni opposte lungo la costa due getti. Quello più meridionale si ricongiunge ai flussi in ingresso dai canali, mentre quello più settentrionale lambisce tutta la costa nord-est del I seno e va ad alimentare, biforcandosi, la circolazione nel 2° seno. Qui si instaurano due grandi vortici, orario quello nella parte settentrionale dell'area ed antiorario quello nella parte meridionale. Inoltre si nota anche la presenza di una piccola formazione vorticoso ad ovest in prossimità del canale di collegamento tra i due seni del Mar Piccolo. Le velocità della corrente si riducono nelle parti centrali dei suddetti vortici, mentre i rami più esterni sono caratterizzati dalle maggiori intensità.

Analoghi trend, alla stessa quota, si osservano con ciclicità anche nel 15° ed ultimo giorno, rispettivamente per le condizioni di DBM, AM, DAM e BM.

In maniera analoga si è esaminata la circolazione ad una quota intermedia, ovvero per $z=-5\text{m}$ (Figura 32). Si mostra l'andamento della corrente nel 3° giorno di simulazione in condizioni DBM. Si nota ancora il prelievo ad opera dell'idrovora, che richiama acqua dalla parte centrale del I seno e l'istaurarsi nel I seno di due deboli circolazioni antiorarie nella parte vicina ai canali di accesso, mentre nella sulla costa orientale del I seno si addossa un vortice orario i cui bracci esterni sono piuttosto intensi. Nel canale di collegamento tra i due seni, si osserva una corrente diretta verso il I seno, alimentata dal vortice antiorario formatosi nella parte meridionale del II seno. La parte restante del II seno è interessata da un trend antiorario con valori di corrente più intensi nella zona centrale e in quella costiera. Il flusso verso l'idrovora si intensifica in condizioni AM, anche a seguito dell'ingresso in Mar Piccolo di un getto forte dal Canale Navigabile. Il vortice prossimo a questo canale si apre generando un flusso costiero diretto verso est che poi piega a nord-ovest verso il centro dell'area. Il vortice orario nella parte più orientale del I seno persiste ed il suo ramo discendente alimenta il getto che raggiunge il II seno. Qui si osservano ancora i due andamenti opposti già rilevati nelle condizioni DBM. Nello *step* temporale successivo, ovvero per condizioni DAM, quando nuovamente si riduce il flusso nei due canali di accesso al bacino, si ripropongono andamenti di corrente analoghi a quelli osservati nelle condizioni DBM. I due piccoli vortici prossimi a questi due canali sono caratterizzati da intensità maggiori, perché alimentati dal debole getto in ingresso attraverso il Canale Navigabile. Questi stessi vortici scompaiono in condizioni BM, in quanto si intensifica il flusso diretto verso il I seno che attraversa il canale di collegamento. Ad ulteriore testimonianza della stazionarietà raggiunta, le strutture idrodinamiche su descritte si ripresentano pressoché invariate, per i rispettivi istanti temporali nel ciclo di marea, anche nel 15° giorno di simulazione.

Per la simulazione in Estate, con riferimento al campo di vento da usare in input, si sono nuovamente considerati i grafici stagionali.

Come per il test invernale, anche in questo caso si osserva il ritardo di circa tre ore con cui la marea imposta sul confine aperto giunge in Mar Piccolo, ed inoltre si conferma il carattere ripetitivo della corrente nel bacino per effetto del ciclo di marea imposto.

In Figura 35 si mostra l'andamento della circolazione orizzontale nel 3° giorno alla quota $z=-2\text{m}$, rispettivamente alle ore 09:00, 12:00, 15:00 e 18:00. Si nota un flusso intenso in ingresso nei due canali del

Mar Piccolo, che alimenta una forte corrente costiera che si dirige verso l'idrovora e poi si insinua verso il centro del I seno, alimentando un vortice antiorario schiacciato sulla costa occidentale. Un'altra parte del flusso in ingresso costeggia l'area dell'Arsenale Militare ed entra nel 2° seno. Qui si instaurano due grandi vortici, uno orario, nella parte settentrionale dell'area ed uno parte più orientale con una corrente più intensa lungo la costa. Le velocità della corrente si riducono nelle parti centrali dei suddetti vortici. La ciclicità della circolazione indotta dalla marea viene confermata, con strutture idrodinamiche che si ripetono. Le mappe di corrente, sempre alla quota $z=-2m$, nel 15° giorno evidenziano le stesse caratteristiche già descritte con riferimento al 3° giorno.

Pertanto le principali strutture di circolazione invernale si possono così riassumere: nel 1° seno si osserva un intenso flusso costiero nella parte nord-est, che si richiude in vortice orario alle maggiori profondità; la presenza di strutture vorticosi locali, influenzate dai getti in transito nei canali di ingresso e nel canale di collegamento; nel 2° seno si osserva la presenza di due vortici opposti con intensità rilevanti sui rami esterni. Nel periodo estivo, invece si osserva: nel 1° seno la presenza di due vortici opposti, con maggiori intensità in prossimità dell'idrovora ILVA; nel 2° seno si osserva la presenza di due vortici opposti con intensità rilevanti sul ramo ascendente del vortice più orientale.

Dall'analisi del modello di circolazione si evincono e confermano, inoltre, alcune considerazioni generali: esiste un contributo consistente da parte dell'Idrovora dell'ILVA sul flusso di richiamo e sulla circolazione complessiva del 1° seno del mar Piccolo; caratteristica ciclicità della circolazione per effetto delle condizioni imposte al sistema di marea ciclica e di vento omogeneo; un'inversione dei flussi nei canali tra alta marea e bassa marea; esistono delle strutture vorticosi sul 1° e 2° seno con variazioni modeste nel tempo; le intensità delle correnti decrescono procedendo verso il fondo dei bacini.

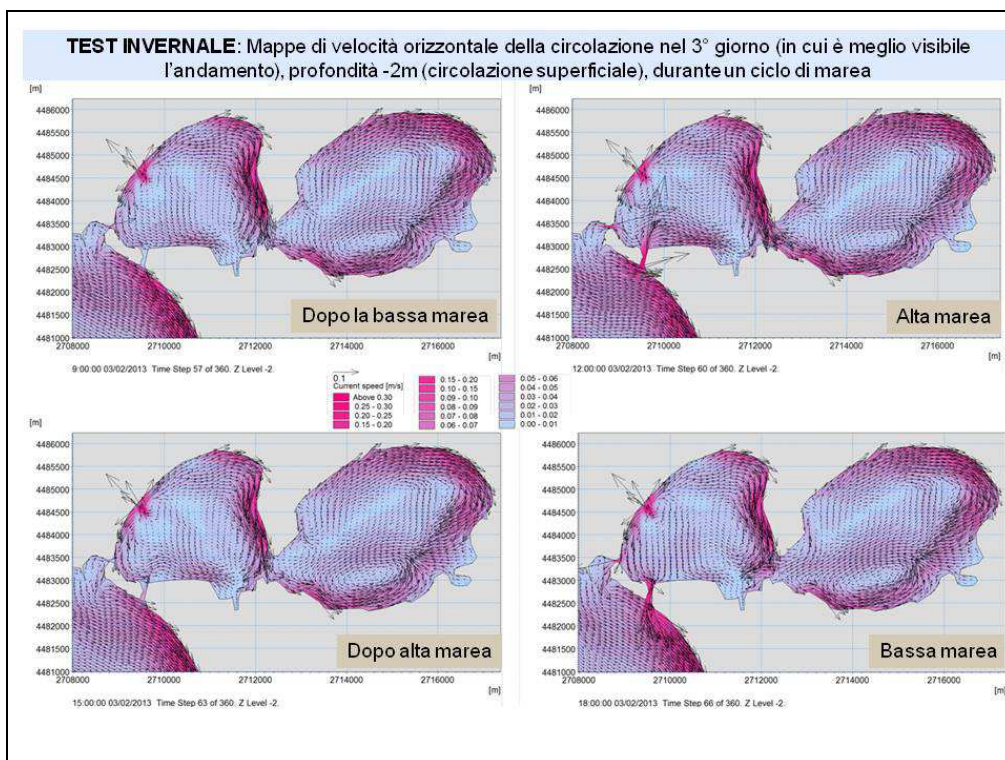
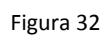
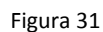


Figura 30



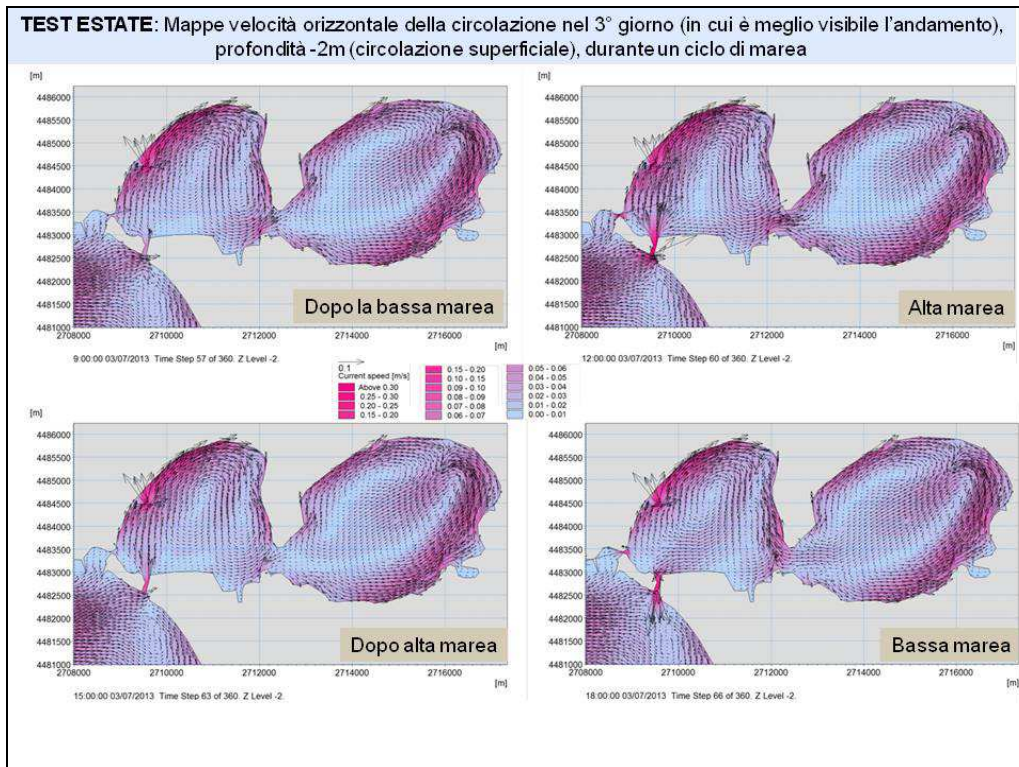


Figura 33

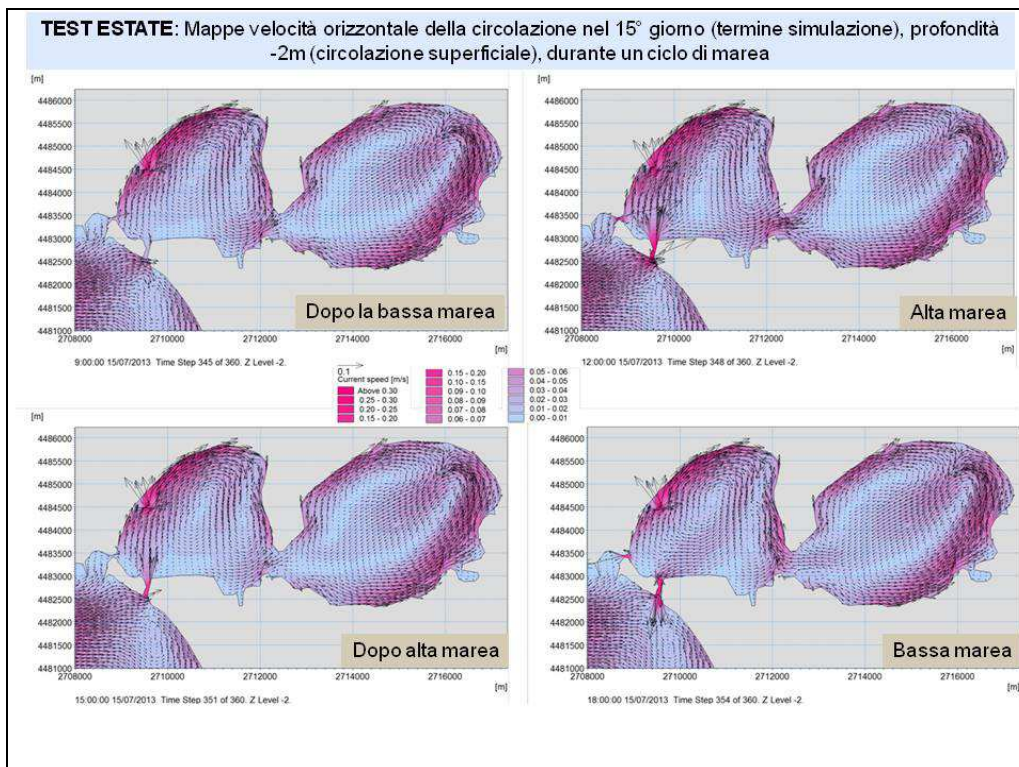


Figura 34

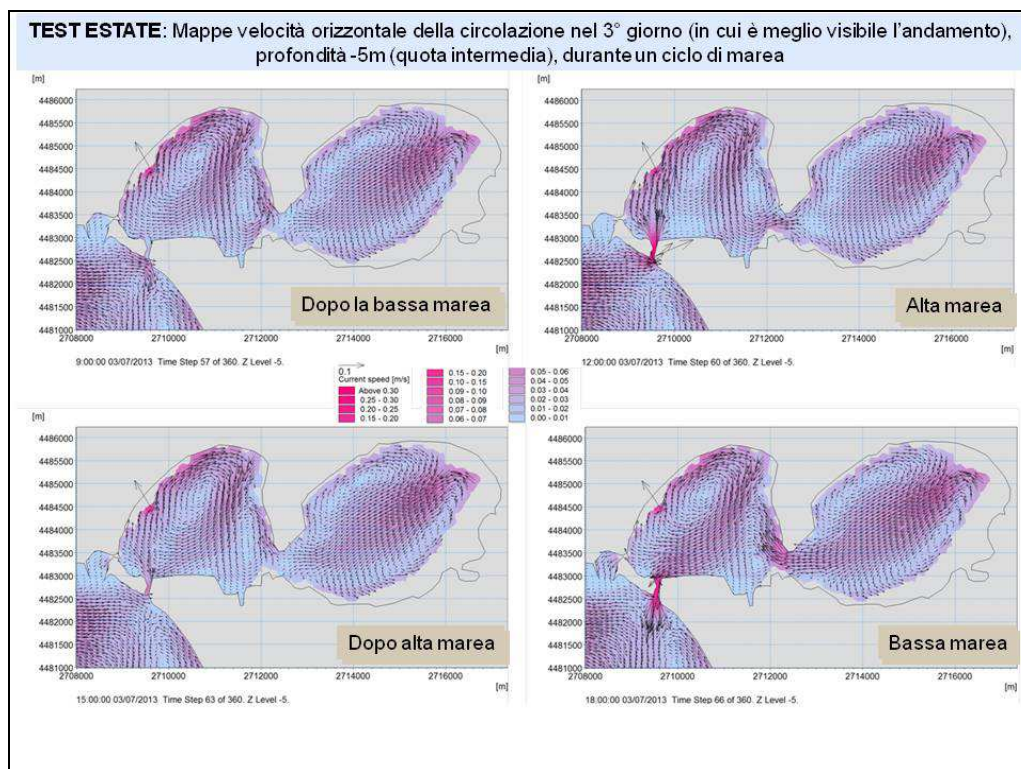


Figura 35

2.6. CARATTERISTICHE GEOTECNICHE DEI SEDIMENTI SUPERFICIALI DEL 1° SENO DEL MAR PICCOLO E MODELLO GEOTECNICO DI RIFERIMENTO (A CURA DEL POLITECNICO DI BARI – DICATECH)

2.6.1. Indagini in situ

Nell'ambito delle attività di studio ed approfondimento delle conoscenze ambientali del Mar Piccolo è stata prevista una caratterizzazione geotecnica dei sedimenti superficiali, localizzati in una zona antistante l'area militare dell'Arsenale della Marina Italiana (Figura 36).

Sono stati, pertanto, eseguiti n. 3 sondaggi a carotaggio continuo (denominati S1, S2 ed S3), con trivella idraulica cingolata e n. 3 sondaggi con carotiere manuale (denominati S1M, S2M ed S3M) di lunghezza 1.5m, per complessive n. 6 carote di sedimento di vario spessore sulle quali, oltre alla descrizione dei profili stratigrafici, sono state eseguite prove geotecniche di laboratorio, finalizzate alla valutazione delle caratteristiche meccaniche dei campioni, ed analisi mineralogiche e geochemiche.

L'ubicazione dei sondaggi è stata dettata dall'opportunità di fare riferimento a risultati complementari già noti sulla ricostruzione stratigrafica del sito e sul riconoscimento dei sedimenti dal punto di vista granulometrico. Le tre stazioni sono, infatti, state replicate in prossimità di tre stazioni precedentemente campionate nel 2005 ed estrapolate dal piano di caratterizzazione ambientale realizzato per la così detta "Area 170 ha" e definito dall'allora Commissario Delegato per l'emergenza rifiuti della Regione Puglia.

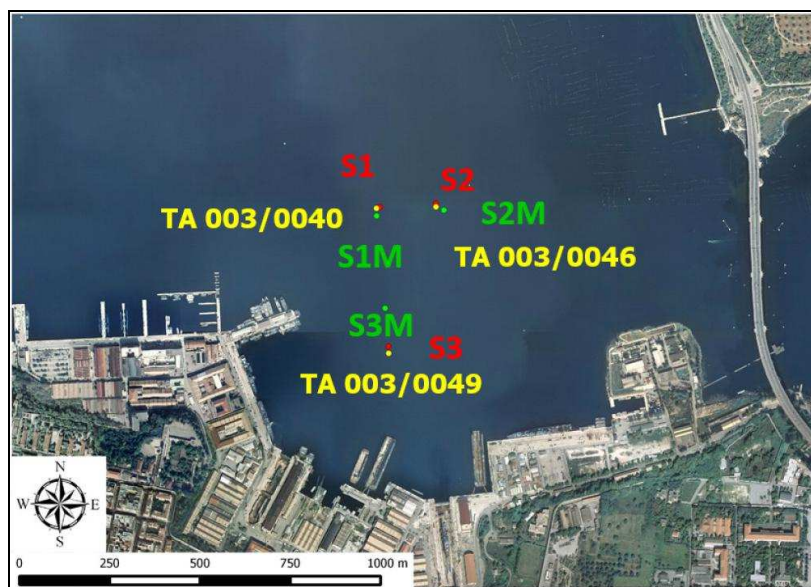


Figura 36

Nonostante le difficoltà di ordine autorizzativo e tecnico-operative è stato possibile caratterizzare i primi 5 metri di sedimento, con un dettaglio maggiore per il primo metro, e la possibilità di ricostruire, in una stazione, la stratigrafia fino alla profondità di circa 18 m dal fondo marino.

Operativamente i campionamenti eseguiti con carotiere sono stati effettuati a carotaggio continuo con una sonda meccanica a rotazione del diametro di 101 mm. La perforazione è stata eseguita impiegando una tubazione metallica provvisoria di rivestimento di diametro 127 mm. Durante il campionamento sono state riscontrate notevoli difficoltà nel prelievo dei sedimenti, a causa della natura spesso inconsistente degli stessi e delle sfavorevoli condizioni meteorologiche. Tale circostanza, se da un lato ha comportato l'impossibilità di prelevare il numero di campioni indisturbati previsto per ogni sondaggio, d'altro canto ha consentito di investigare, attraverso il sondaggio a carotaggio continuo, profondità superiori rispetto a quelle programmate. In Tabella 5 sono riportate le singole schede di campionamento con l'indicazione delle relative profondità raggiunte.

	SCHEDA CAMPIONAMENTO SEDIMENTI			
SITO	CAMPAGNA	DATA	AREA PRELIEVO	STAZIONE
Taranto Mar Piccolo	Novembre 2013	11/11/2013	170 ha	S1
COORDINATE TEORICHE		COORDINATE REALI		
Lat.: 40°28'44.1"	Long.: 17°15'27.4"	Lat.: 40° 28' 44.63"	Long.: 17° 15' 27.79"	
CAMPIONI		PROFONDITÀ DAL FONDO MARINO [m]	PROFONDITÀ DAL LIVELLO DEL MARE [m]	
		0.00 – 16.50	13.00 – 29.50	
S1 C1		11.50 – 12.00	24.50 – 25.00	

	SCHEDA CAMPIONAMENTO SEDIMENTI			
SITO	CAMPAGNA	DATA	AREA PRELIEVO	STAZIONE
Taranto Mar Piccolo	Novembre 2013	11/11/2013	170 ha	S2
COORDINATE TEORICHE		COORDINATE REALI		
Lat.: 40°28'44.3"	Long.: 17°15' 34.8"	Lat.: 40° 28' 44.53"	Long.: 17° 15' 36.10"	
CAMPIONI		PROFONDITÀ DAL FONDO MARINO [m]	PROFONDITÀ DAL LIVELLO DEL MARE [m]	
		0.00 – 8.55	12.45 – 21.00	

	SCHEDA CAMPIONAMENTO SEDIMENTI			
SITO	CAMPAGNA	DATA	AREA PRELIEVO	STAZIONE
Taranto Mar Piccolo	Novembre 2013	11/11/2013	170 ha	S3
COORDINATE TEORICHE		COORDINATE REALI		
Lat.: 40°28' 31.6"	Long.: 17°15'28.0"	Lat.: 40° 28' 33.2"	Long.: 17° 15' 28.52"	
CAMPIONI		PROFONDITÀ DAL FONDO MARINO [m]	PROFONDITÀ DAL LIVELLO DEL MARE [m]	
		0.00 – 18.25	12.25 – 30.50	
S3 C1		16.00 – 16.30	28.25 – 28.55	
S3 C2		18.00 – 18.25	30.25 – 30.50	

Tabella 5

Le carote di sedimento estratte sono state sistemate in cassette catalogatrici e trasportate presso la sede di Taranto del Laboratorio Geotecnico del Politecnico di Bari. Sui bordi di ciascuna cassetta sono riportate le quote delle carote rispetto al fondale marino e sui coperchi delle stesse sono state applicate etichette adesive contenenti i dati identificativi. Le singole cassette sono state fotografate nelle prime 24 ore dal prelievo. È stato previsto anche il prelievo, ogni 25 cm, di piccoli campioni di sedimento per determinarne il

contenuto di acqua. Infine tutte le carote sono state avvolte in pellicola trasparente e sigillate con paraffina fusa.

Dall'esame delle stratigrafie si deduce che i sedimenti sono costituiti essenzialmente da materiali a granulometria fine, limi sabbiosi ed argille limose, con frazione argillosa che tende ad aumentare con la profondità, attribuendo alle carote consistenza prevalentemente fluido-plastica in corrispondenza dei sedimenti più superficiali e recenti, mentre tende a diventare plastica oltre 15-16 m di profondità, come emerso dalle stazioni S1 ed S3. Per la stazione S3 la variazione nella natura del sedimento è apprezzabile oltre che dal contrasto di consistenza anche da quello cromatico, con netta indicazione del tetto delle argille plio-pleistoceniche. Le stratigrafie dei primi metri dei sondaggi effettuati in questa campagna geognostica sembrano confermare i profili stratigrafici dei sondaggi effettuati da ISPRA nel 2005.

La componente bioclastica è presente in tutti i campioni e varia da centimetrica, nei primi metri di sondaggio, a sub-millimetrica, a profondità maggiori. Il ritrovamento di un gasteropode marino, nel quarto scomparto della cassetta catalogatrice del sondaggio S3, ha permesso di individuare, con maggiore certezza, la zona di passaggio tra il sedimento recente olocenico ed il tetto delle argille azzurre plio-pleistoceniche.

L'utilizzo del carotiere manuale ha consentito il prelievo di campioni sul primo metro di sedimento in tutte e tre le stazioni, dove è stato possibile recuperare aliquote che presentavano un colore grigio-nerastro e consistenza fluido-plastica (Figura 36).

2.6.2. Attività di sperimentazione geotecnica

Per la sperimentazione geotecnica sono stati utilizzati gli apparecchi e le strumentazioni del presenti presso il Laboratorio di Geotecnica della sede di Taranto del Politecnico di Bari.

Nel programma sperimentale, particolare attenzione è stata rivolta all'analisi del comportamento in compressione e scarico edometrici dei sedimenti, dei quali è stata anche indagata la resistenza al taglio (strumentazione per il taglio diretto). Le proprietà indice e le caratteristiche meccaniche e chimiche dei sedimenti sono state determinate su tutti i campioni a disposizione (prelevati con carotiere a rotazione e manuale).

Le prove di caratterizzazione meccanica sono state precedute dalle necessarie operazioni di taratura dei trasduttori (di spostamento LVDT-Linear Variable Differential Transformer), impiegati sia nelle prove edometriche che in quelle di taglio diretto. Ai fini del riconoscimento e della classificazione dei sedimenti, sui medesimi è stata effettuata l'analisi granulometrica unitamente alla determinazione del peso specifico della fase solida, del peso dell'unità di volume, del contenuto naturale d'acqua, del contenuto di materia organica e dei limiti di Atterberg (indicano il valore limite del contenuto di acqua per il quale si registra una transizione dello stato fisico: solido, semisolido, plastico e liquido).

Le curve granulometriche sono state ottenute per setacciatura ad umido e sedimentazione secondo le norme ASTM D 421-422 (ASTM-American Society for Testing Materials, 2003).

Il campione da utilizzare per l'analisi granulometrica è stato inumidito, disgregato e sottoposto a setacciatura utilizzando una pila di setacci. La quale è stata poi messa ad essiccare in forno a 105° per 24 ore. Dalle successive pesate sono, infine, scaturite le percentuali di "passante". Le operazioni di setacciatura sono state effettuate utilizzando la serie di vagli ASTM (apertura del setaccio in corrispondenza di 6 step: 2, 1, 0.425, 0.3, 1.15 e 0.075 mm).

L'analisi per sedimentazione, necessaria per il "completamento" della curva granulometrica su cui "leggere" i valori delle frazioni ghiaiosa (GF), sabbiosa (SF), limosa (MF) ed argillosa (CF) è stata effettuata sul passante al setaccio a 0.075 mm, utilizzando l'idrometro 151 H ed applicando la legge di Stokes.

La determinazione del peso dell'unità di volume è stata eseguita secondo la norma ASTM D 1188 (ASTM, 2003), mentre il contenuto naturale d'acqua è stato determinato secondo la norma ASTM D 2216-80 (ASTM, 2003), utilizzando una bilancia di precisione (0,01 g). I materiali sono stati fatti essiccare in forno alla temperatura di 105 °C per almeno 24 ore o finché la differenza tra due pesate successive, a distanza di

almeno mezz'ora l'una dall'altra, non fornisca una variazione di misura poco significativa ($<0,1\%$). Per ogni campione esaminato sono state effettuate almeno due misurazioni di contenuto d'acqua e ne è stato assunto il valore medio. La determinazione dei limiti di Atterberg è stata effettuata secondo la procedura standard in base alla quale il limite liquido, che segna il passaggio da consistenza plastica a consistenza liquida, è stato determinato mediante l'utilizzo del Cucchiaio di Casagrande, diagrammando di valori di contenuto di acqua in funzione del numero di colpi ed assumendo come limite liquido il contenuto d'acqua corrispondente a 25 colpi. La differenza tra limite liquido e limite plastico fornisce il valore dell'indice di plasticità. Il peso specifico della fase solida è stato determinato secondo la norma CNR UNI 10013.

Dalle semplici relazioni tra i parametri citati scaturiscono i valori delle grandezze derivate: indice di liquidità e indice dei vuoti.

Per quanto riguarda le prove edometriche è stata impiegata strumentazione "a braccio singolo", che consente di raggiungere pressioni verticali massime di 5 MPa su provini di diametro di 50 mm ed altezza di 20 mm, e celle edometriche convenzionali (base, testa di carico, anello edometrico in acciaio inossidabile, contenitore per l'acqua in plexiglas e due pietre porose a grana grossa). Le prove sono state eseguite ad incrementi di carico controllato crescenti (geometricamente) a partire da una pressione iniziale di 2.5 kPa, adottando tempi di consolidazione di almeno 24 ore. La cella edometrica è stata riempita con acqua di mare ed il drenaggio è stato inserito sia alla base che alla testa del provino.

Per tutte le prove edometriche l'acquisizione dei dati è avvenuta sia in modo automatico, per mezzo di trasduttori elettrici di spostamento, che attraverso letture al comparatore centesimale. Il decorso dei cedimenti nel tempo, per ogni gradino di carico, è stato rilevato per periodi temporali sufficientemente lunghi (almeno 24 ore), così da permettere l'intero sviluppo della consolidazione primaria e della parte iniziale della consolidazione secondaria. Le caratteristiche di consolidazione sono state ottenute dalle *curve cedimento-tempo*.

Le prove di taglio diretto sono state realizzate mediante una pressa orizzontale in grado di realizzare una velocità di avanzamento costante per mezzo di un motore elettrico. Il carico verticale sul materiale in prova viene applicato mediante telaio a carico diretto. La prova, solitamente drenata, consta di una fase di consolidazione e di una, successiva, di taglio. I provini di terreno, di dimensioni 60x60x20 mm, sono stati posizionati all'interno della *scatola di taglio*, costituita da due semiscatole in acciaio inox sovrapposti. Durante la prova di taglio si impone alla semiscatola inferiore uno spostamento a velocità costante e si misura la resistenza rispetto a tale spostamento, della semiscatola superiore. La rottura del provino avviene lungo il piano orizzontale di separazione fra le due semiscatole. Nelle prove svolte sui sedimenti di natura prevalentemente argillosa (bassissima permeabilità), la condizione di taglio drenato è stata garantita dai bassi valori della velocità di deformazione (0,003 mm/min).

Le analisi mineralogiche sono state effettuate presso i Laboratori di Geologia Medica e Ambientale dell'Istituto di Metodologie per l'Analisi Ambientale (IMAA-CNR). L'identificazione delle fasi minerali del campione totale e la relativa analisi quantitativa sono state eseguite su un preparato di polvere orientata casualmente, mentre per i minerali presenti nella frazione $< 2 \mu\text{m}$ sono stati approntati tre preparati orientati. Le analisi sono state eseguite impiegando un diffrattometro Rigaku MiniFlex.

La caratterizzazione geochimica in termini di capacità di scambio cationico (CSC) e dei più comuni cationi scambiabili è stata svolta presso il Laboratorio di Chimica Agraria e Ambientale del Dipartimento di Scienze del Suolo e delle Piante e degli Alimenti dell'Università di Bari.

2.6.3. Risultati delle attività di sperimentazione geotecnica (Composizione, proprietà fisiche e plasticità)

I livelli superficiali delle carote hanno mostrato tutti un elevato contenuto in sostanza organica e la loro setacciatura ha messo in luce un consistente contenuto di gusci e frammenti bioclastici di organismi marini, soprattutto bivalvi e gasteropodi. Per questo motivo le prove geotecniche sono state condotte sia sul

materiale “tal quale” sia su quello preliminarmente setacciato ASTM (diametro) ad 1 mm. In Figura 37. sono diagrammate le curve granulometriche rispettivamente dei campioni “tal quali” e degli stessi campioni privati del trattenuto (gusci e frammenti di guscio di organismi marini) al setaccio ASTM n. 18, avente apertura delle maglie di 1 mm). I campioni più superficiali prelevati con sommozzatore mostrano un contenuto di gusci e bioclasti maggiori rispetto ai campioni prelevati con carotiere, rappresentativi di maggiori spessori (fino a 6.25 m). Si evidenzia una evidente eteropia orizzontale legata ad una eterogeneità granulometrica del fondale.

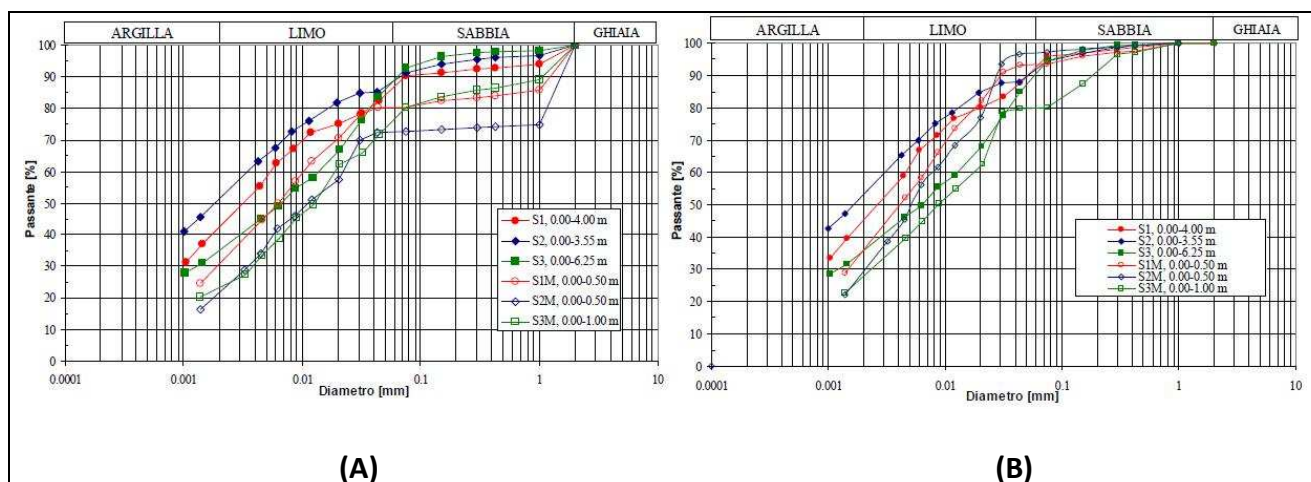


Figura 37. Curve granulometriche dei campioni (A) “tal quali” e (B) privati della componente bioclastica. I simboli pieni indicano campioni prelevati mediante carotiere; quelli vuoti, i campioni prelevati a mano mediante sommozzatore. La profondità dei campioni è relativa al fondo del mare).

In Tabella 6. sono riassunte in forma sinottica le proprietà indice e di composizione dei sedimenti in esame (peso dell’unità di volume totale; peso specifico della fase solida; contenuto naturale di acqua; indice dei vuoti; limite liquido; indice di plasticità; indice di liquidità; contenuto di sostanza organica).

SONDAGGIO	PROFONDITÀ DEI CAMPIONI DAL FONDO MARINO [m]	PROFONDITÀ DEI CAMPIONI DAL LIVELLO DEL MARE [m]	COMPOSIZIONE, PROPRIETÀ FISICHE E PLASTICITÀ												
			GF [%]	SF [%]	MF [%]	CF [%]	γ [kN/m ³]	G _s -	w _n [%]	e -	w _L [%]	IP [%]	IL -	CO [%]	
S1	M 0.00-0.50	M 13.00-13.50	0	20 (6)	49 (58)	31 (36)	13.44	2.560	163.0	4.17	86.50	47.93	2.60		
	0.00-4.00	13.00-17.00	0	12 (8)	46 (47)	42 (45)	13.51	2.610	143.0	3.73	75.25	42.48	2.59		
	4.00-8.00	17.00-21.00	0	4	48	48		2.711	62.9	1.70	60.95	33.49	1.05		
	8.00-11.50	21.00-24.50	0	6	48	46		2.711	62.9	1.65	63.17	35.52	0.99		
	CI 11.50-12.00	CI 24.50-25.00	0	3	44	53	17.03	2.741	51.9	1.42	60.70	37.49	0.76		
	12.00-15.00	25.00-28.00	0	5	58	37		2.736	58.6	1.60	63.32	36.11	0.87		
	15.00-16.50	28.00-29.50	0	2	44	54		2.736	58.0	1.59	55.25	29.41	1.09		
S2	M 0.00-0.50	M 12.45-12.95	0	27 (3)	51(68)	22 (29)	13.49	2.580	170.0	4.39	85.60	49.37	2.71		
	0.00-3.55	12.45-16.00	0	12 (8)	36(39)	52 (53)	14.35	2.640	119.8	3.16	71.50	42.28	2.14	5.0	
	3.55-6.05	16.00-18.50						2.714	53.1	1.44	45.79	22.78	1.32		
	6.05-8.55	18.50-21.00						2.734	49.5	1.35					
S3	M 0.00-1.00	M 12.25-13.25	0	23 (20)	54 (52)	23 (28)	13.85	2.560	170.0	4.35	79.80	40.81	3.21	5.9	
	0.00-6.25	12.25-18.50	0	12 (9)	53 (56)	35 (36)	17.22	2.650	54.2	1.43	42.25	21.03	1.57		
	6.25-10.75	18.50-23.00	0	14	56	30		2.719	53.9	1.47	47.47	25.28	1.26		
	10.75-15.25	23.00-27.50	0	15	52	33		2.714	57.4	1.57	48.57	26.32	1.33	3.2	
	15.25-16.00	27.50-28.25													
	CI 16.00-16.30	CI 28.25-28.55													
	16.30-17.25	28.55-29.50	0	8	44	48		2.723	51.0	1.39	48.56	26.14	1.09		
	17.25-18.00	29.50-30.25	0	9	46	45		2.734	48.7	1.33	43.55	23.08	1.22	0.7	
	CI 18.00-18.25	CI 30.25-30.50													

Tabella 6. Composizione, proprietà fisiche e di plasticità dei sedimenti campionati. ((M: campioni prelevati manualmente; CI: campioni indisturbati; GF: frazione ghiaiosa; SF: frazione sabbiosa; MF: frazione limosa; CF: frazione argillosa (i valori tra parentesi si riferiscono alle determinazioni effettuate privando il campione del trattenuto al setaccio n. 18, apertura delle maglie: 1 mm); γ : peso dell’unità di volume totale; G_s: peso specifico della fase solida; w_n: contenuto naturale di acqua; e: indice dei vuoti; w_L: limite liquido; IP: indice di plasticità; IL: indice di liquidità; CO: contenuto di sostanza organica)).

In Tabella 7 sono, invece, riportate le classi granulometriche [frazione argillosa (CF), limosa (MF), sabbiosa (SF) e ghiaiosa (GF)] di tutti i campioni determinate secondo il sistema MIT AGI/S e la loro classificazione granulometrica secondo quanto suggerito da AGI (1994).

SONDAGGIO (S) O PRELIEVO MANUALE (SM)	PROF. DAL FONDO MARINO [m]	PROF. DAL LIVELLO DEL MARE [m]	METODOLOGIA ESECUZIONE ANALISI GRANULOMETRICA	DISTRIBUZIONE GRANULOMETRICA				CLASSIFICAZIONE
				GF [%]	SF [%]	MF [%]	CF [%]	
SIM	0.00-0.50	13.00-13.50	CON FOSSILI	0	20	49	31	LIMO CON ARGILLA SABBIOSA
			SENZA FOSSILI	0	6	58	36	LIMO CON ARGILLA DEBOLMENTE SABBIOSO
S1	0.00-4.00	13.00-17.00	CON FOSSILI	0	12	46	42	LIMO CON ARGILLA SABBIOSA
			SENZA FOSSILI	0	8	47	45	LIMO CON ARGILLA DEBOLMENTE SABBIOSO
	4.00-8.00	17.00-21.00	—	0	4	48	48	LIMO CON ARGILLA-ARGILLA CON LIMO
	8.00-11.50	21.00-24.50	—	0	6	48	46	LIMO CON ARGILLA DEBOLMENTE SABBIOSO
	CI 11.50-12.00	CI 24.50-25.00	—	0	3	44	53	ARGILLA CON LIMO
	12.00-15.00	25.00-28.00	—	0	5	58	37	LIMO CON ARGILLA DEBOLMENTE SABBIOSO
	15.00-16.50	28.00-29.50	—	0	2	44	54	ARGILLA CON LIMO
S2M	0.00-0.50	12.45-12.95	CON FOSSILI	0	27	51	22	LIMO CON SABBIA ARGILLOSO
			SENZA FOSSILI	0	3	68	29	LIMO CON ARGILLA
S2	0.00-3.55	12.45-16.00	CON FOSSILI	0	12	36	52	ARGILLA CON LIMO SABBIOSO
			SENZA FOSSILI	0	8	39	53	ARGILLA CON LIMO DEBOLMENTE SABBIOSA
S3M	00.00-1.00	12.25-13.25	CON FOSSILI	0	23	54	23	LIMO SABBIOSO-LIMO ARGILLOSO
			SENZA FOSSILI	0	20	52	28	LIMO CON ARGILLA SABBIOSO
S3	0.00-6.25	12.25-18.50	CON FOSSILI	0	12	53	35	LIMO CON ARGILLA SABBIOSO
			SENZA FOSSILI	0	9	55	36	LIMO CON ARGILLA DEBOLMENTE SABBIOSO
	6.25-10.75	18.50-23.00	—	0	14	56	30	LIMO CON ARGILLA SABBIOSO
	10.75-15.25	23.00-27.50	—	0	15	52	33	LIMO CON ARGILLA SABBIOSO
	16.30-17.25	28.55-29.50	—	0	8	44	48	ARGILLA CON LIMO DEBOLMENTE SABBIOSA
	17.25-18.00	29.50-30.25	—	0	9	46	45	LIMO CON ARGILLA DEBOLMENTE SABBIOSO

Tabella 7. Frazioni granulometriche dei campioni analizzati e classificazione dei campioni medesimi secondo AGI (1994).

Dalla Tabella 7 si nota come all'aumentare della profondità, tende a crescere la percentuale di argilla ed a ridursi la percentuale di sabbia; la frazione di limo, invece, si mantiene pressoché costante. In particolare, lungo la verticale di sondaggio S1 il contenuto in argilla aumenta con la profondità da CF=31% a CF=54% ed il contenuto in sabbia si riduce da SF=20% a SF=2%. Tale risultato trova conferma nei dati relativi alla verticale S2 lungo la quale il contenuto in argilla aumenta con la profondità da CF=22% a CF=53% ed il contenuto in sabbia si riduce da SF=27% a SF=8%. Anche nel sondaggio S3 si osserva un andamento simile, pur se il contenuto massimo di argilla nel campione più profondo è pari a CF=45%. Risulta, inoltre, che i campioni sono in prevalenza classificabili come Limo con Argilla da sabbioso a debolmente sabbioso per circa i primi 10 m di sedimento, mentre per profondità maggiori, i medesimi campioni sono costituiti essenzialmente da Argille con Limo sabbiose o debolmente sabbiose.

In Figura 38 è diagrammato il profilo del peso specifico della fase solida (G_s) in funzione della profondità dei campioni ed i profili del fondo marino per ognuna delle tre verticali indagate. Il valore determinato sui campioni prelevati con carotiere è supposto costante per gli intervalli di profondità rappresentati da segmenti verticali. È da notare che valori di peso specifico della fase solida ($G_s = 2.56-2.58$) ottenuti per i campioni più superficiali sono sensibilmente più bassi di quelli ($G_s = 2.72-2.75$) dei campioni profondi. Tale differenza è imputabile al maggior contenuto di detriti organici e di sostanza organica dei campioni superficiali, parzialmente temperato dalla presenza negli stessi di minerali ferrosi (ematite).

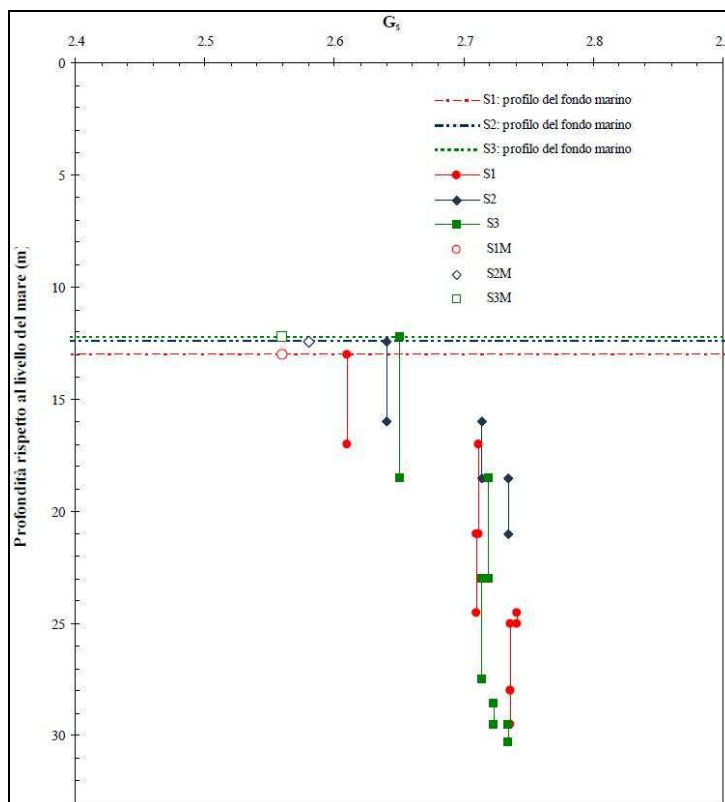


Figura 38. Profilo del peso specifico della fase solida (G_s) con la profondità. La posizione del fondo marino è indicata dalle rette orizzontali in tratteggio (i simboli pieni indicano campioni prelevati mediante carotiere; quelli vuoti, i campioni prelevati a mano mediante sommozzatore).

In relazione alla sostanza organica (CO), come mostra la Tabella 7, il suo contenuto nei campioni prelevati entro i primi 5 m di sedimento è compreso tra 5.0 e 5.9% e si riduce al crescere della profondità fino a valori prossimi allo zero nei campioni prelevati da oltre 17 m dal fondo marino.

I valori di contenuto naturale d'acqua lungo le verticali delle stazioni sono piuttosto variabili (S1 e S2 rispettivamente tra 56 e 166% e tra 49 e 138%; S1M tra 160 e 163%; S2M tra 133 e 171%; S3M tra 123 e 175%; S3 tra 52 e 68%). Il campione indisturbato, ricavato dalla stazione S1, è caratterizzato da un contenuto naturale d'acqua più basso rispetto a quelli del materiale prelevato con carotiere all'incirca alla stessa profondità sulla stessa verticale. La riduzione del contenuto d'acqua a partire dalla profondità di prelievo del campione indisturbato fino al fondo della verticale S1 farebbe ipotizzare che a quella profondità si individuerrebbe il passaggio dal sedimento vero e proprio alle Argille Azzurre tarantine.

L'andamento dell'indice dei vuoti con la profondità (Figura 39.) conferma quanto appena detto, dato lo stretto legame analitico tra queste due grandezze. In particolare, i valori dell'indice dei vuoti del materiale prelevato lungo tutta la verticale S3 sono simili a quelli della parte più profonda del sondaggio S1 e che lungo le verticali S1 ed S2 è individuabile un orizzonte superficiale di materiale di circa 5-6 m di spessore caratterizzato da valori dell'indice molto maggiori di quelli del materiale più profondo. Tale passaggio appare non graduale ed occorrente a profondità di circa 5 m dal fondo marino.

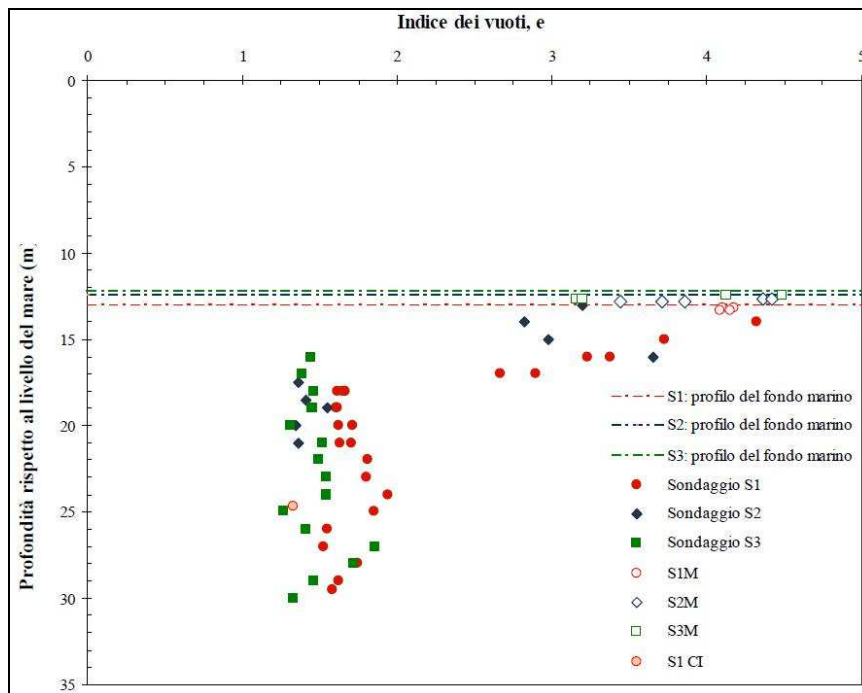


Figura 39. Andamento dell'indice dei vuoti con la profondità. La posizione del fondo marino è indicata dalle rette orizzontali in tratteggio (i simboli pieni indicano campioni prelevati mediante carotiere; quelli vuoti, i campioni prelevati a mano mediante sommozzatore).

La Figura 40 mostra la variazione, con la profondità, del contenuto naturale d'acqua, del limite liquido e del limite plastico. Si nota come lungo le verticali S1 ed S2 il materiale presente nei primi 5 m è caratterizzato da valori degli indici maggiori rispetto a quelli del materiale più profondo; per il sondaggio S3 fino a circa 12 m dal fondo gli indici appaiono più bassi di quelli, corrispondenti, determinati per il sondaggio S1; oltre 5 m dal fondo, lungo le verticali S1 e S3, l'andamento dei valori non subisce variazioni significative con la profondità

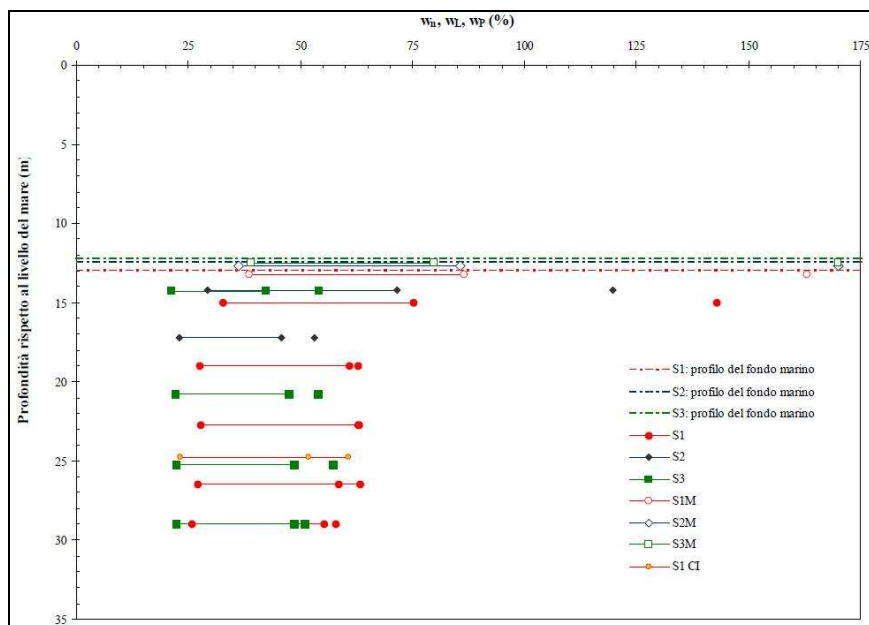


Figura 40. Variazione del contenuto naturale d'acqua, del limite liquido e del limite plastico con la profondità. La posizione del fondo marino è indicata dalle rette orizzontali in tratteggio (i simboli pieni indicano campioni prelevati mediante carotiere; quelli vuoti, i campioni prelevati a mano mediante sommozzatore).

La Figura 41 riporta l'andamento con la profondità dell'indice di consistenza (IC). Esso è sempre negativo nei primi 5 m di sedimento ed assume valori positivi (sempre minori di 0.5) soltanto in corrispondenza di profondità superiori a circa 11 m dal fondo marino lungo la verticale S1. In particolare, il campione indisturbato S1 C1 è caratterizzato dal più elevato valore dell'indice di consistenza ($IC = 0.23$). Tale valore, come pure l'indice dei vuoti superiori all'unità, rivelano che il campione indisturbato se rappresenta le Argille Azzurre di Taranto, ne riproduce i caratteri di fronti alterati e risedimentati.

Valori negativi dell'indice rilevano una consistenza fluida con valori di contenuto naturale d'acqua, molto maggiori del limite liquido (Limiti di Atterberg e stati fisici, Figura 42). In particolare, lo strato più superficiale è caratterizzato da valori di contenuto d'acqua che sono più del doppio del limite liquido. Per tali contenuti d'acqua, secondo le classi di consistenza geotecnica comunemente adottate per classificare i terreni a grana fine, i sedimenti dovrebbero essere allo stato fluido. Tuttavia, i sedimenti (anche i più superficiali) non presentano consistenza marcatamente fluida quanto, piuttosto, *da plastica a fluido-plastica*. La reale consistenza dei sedimenti superficiali rispetto a quella attesa potrebbe essere conseguenza della composizione del fluido interstiziale dei sedimenti che, oltre all'acqua di mare, come noto, contiene anche contaminanti organici e metalli. È, pertanto, ragionevole ipotizzare che anche la risposta meccanica dei sedimenti superficiali potrebbe essere in qualche misura condizionata dal chimismo del fluido interstiziale.

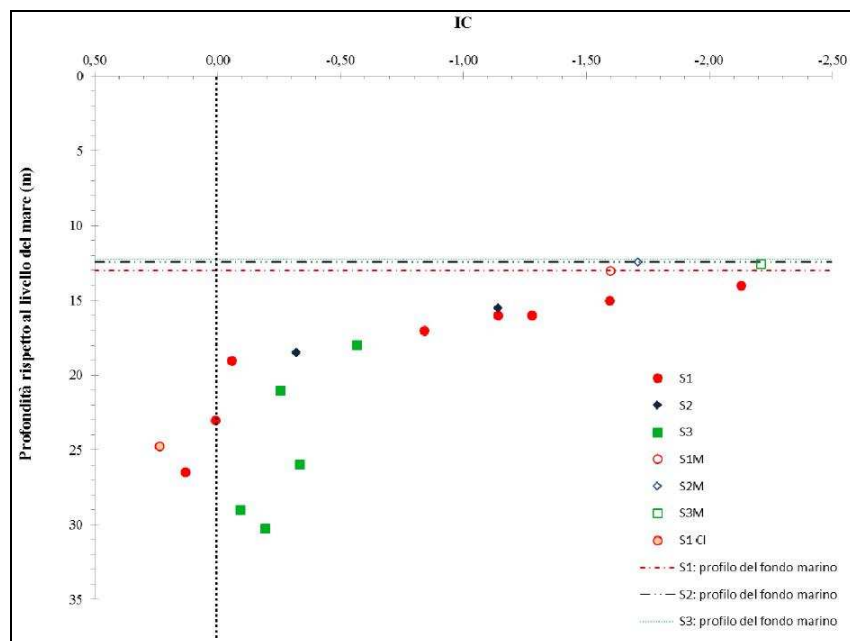


Figura 41. Indice di consistenza (IC) in funzione della profondità. La posizione del fondo marino è indicata dalle rette orizzontali in tratteggio (i simboli pieni indicano campioni prelevati mediante carotiere; quelli vuoti, i campioni prelevati a mano mediante sommozzatore).

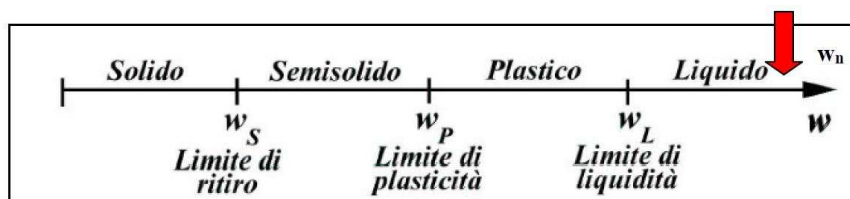


Figura 42. Limiti di Atterberg e stati fisici.

Sulla base della “Carte della plasticità” di Casagrande (1948) i sedimenti sono classificabili come argille inorganiche di elevata plasticità per l'intero campione S1 e nella parte più superficiale di S2, mentre sono classificabili come argille inorganiche di medio-bassa plasticità i sedimenti prelevati dalla stazione S3. Va inoltre osservato che solo il campione S3M è classificabile come limo inorganico di elevata plasticità.

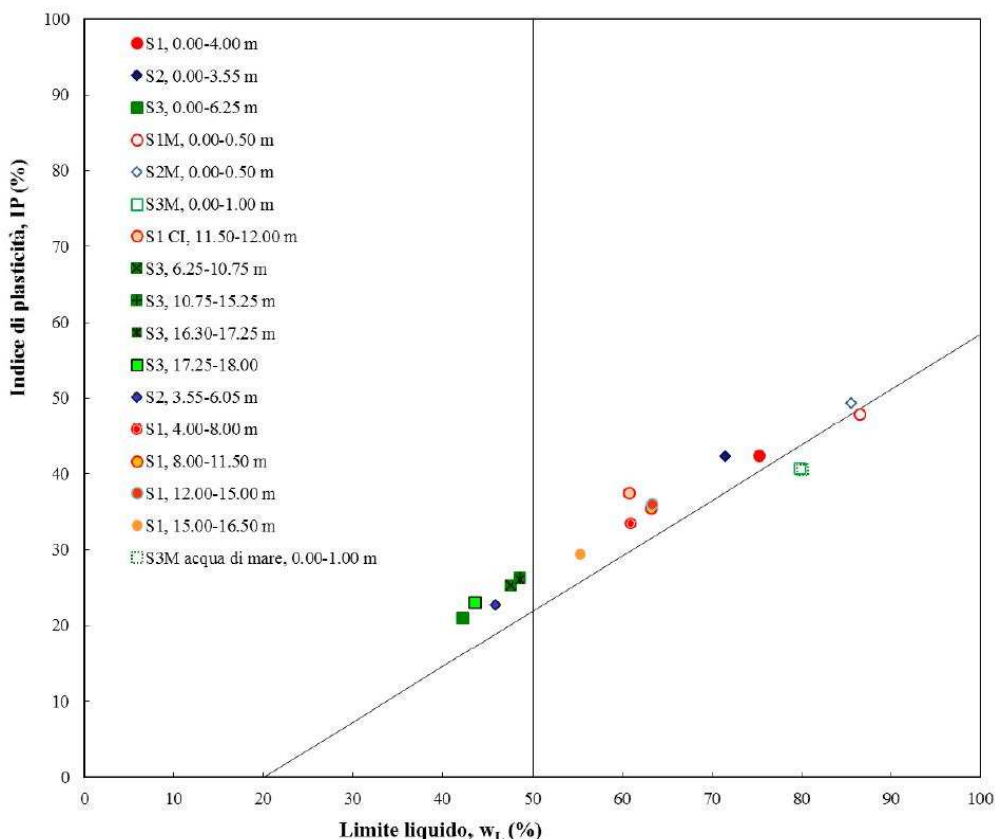


Figura 43. Carta di plasticità di Casagrande (1948). I simboli pieni indicano campioni prelevati mediante carotiere; quelli vuoti, i campioni prelevati manualmente. La profondità dei campioni è relativa al fondo del mare.

Si segnala, infine, che tutti i campioni possono essere classificati (*abaco delle attività*) come “mediamente attivi” e “attivi”, tale aspetto più evidente in quelli superficiali.

Dal punto di vista delle caratteristiche mineralogiche e geochimiche, l'analisi difrattometrica ai Raggi X ha rilevato la presenza di fillosilicati, quarzo, feldspati e carbonati (calcite, dolomite e aragonite in tracce) e, in quantità variabili, anche halite ed ematite. In particolare, i fillosilicati sono rappresentati da fasi espandibili (capacità di accumulare acqua) (illiti/smectiti e clorite/smectite) e da fasi non espandibili (illiti e miche), oltre che da caoliniti e clorite. Nei campioni più superficiali risulta abbondante la presenza di halite, da correlare all'ambiente dal quale il campione medesimo è stato prelevato. Risulta, inoltre, nei medesimi campioni, una sensibile presenza di ematite che, costituendo il principale minerale del ferro, potrebbe anche avere una componente origine antropica, vista anche la vocazione industriale dell'area vasta; tale ipotesi può essere confermata anche dalla riduzione di contenuto di ematite con la profondità del sedimento.

Eccetto che per halite ed ematite, le analisi mostrano che la composizione mineralogica dei campioni totali non presenta significative variazioni con la profondità, al punto che il campione più superficiale e quello più profondo hanno, praticamente, la stessa mineralogia, caratterizzata dalla prevalenza di illite e, anche se con più abbondante presenza di interstrati argillosi espandibili, ricalca sostanzialmente quella delle Argille Azzurre.

Per quanto attiene gli aspetti geochimici, i valori di capacità di scambio cationico ottenuti sono tipici delle argille prevalentemente illitiche (buona capacità di scambio cationico - adsorbimento). In relazione ai principali cationi scambiabili, nelle parti più superficiali del sedimento il catione prevalente è il sodio, che diminuisce con la profondità, analogamente a quanto si verifica per il potassio. Al contrario risulta l'andamento del calcio, la cui abbondanza predomina nel campione più profondo e si riduce verso l'alto. Tale abbondanza potrebbe essere messa in relazione con l'alto contenuto di carbonati delle Argille Azzurre.

tarantine che, attraversate dalla (estremamente) lenta filtrazione verticale dell'acqua di falda profonda trasporterebbe lungo la verticale il catione calcio.

2.6.4. Risultati delle attività di sperimentazione geotecnica (Compressibilità e rigonfiamento)

L'analisi della composizione, delle proprietà indice e delle proprietà fisiche dei materiali esaminati ha condotto all'individuazione di uno strato sommitale di sedimento, spesso circa 5 m, caratterizzato (nella sua porzione più corticale) da una significativa presenza di macroscopici bioclasti (gusci e frammenti di gusci di organismi marini), che costituiscono elementi di disomogeneità della matrice argilloso-limosa influenzandone le proprietà meccaniche.

Sono state condotte otto prove edometriche a "rigonfiamento impedito" effettuate su provini così individuati: tre costituiti dal sedimento superficiale delle stazioni S1, S2 e S3; quattro con il sedimento delle stazioni S1M, S2M, S3M, S3M (C2) ed uno confezionato dal campione indisturbato più profondo prelevato dalla stazione S1. Ciascuna prova è stata eseguita applicando incrementi di carico generalmente in progressione geometrica.

In Figura 44 sono riportati i risultati delle prove edometriche nel piano semilogaritmico indice dei vuoti (e) in funzione della tensione verticale efficace σ'_v . I provini sono stati sottoposti ad una fase di carico e, solo in alcuni casi, ad una successiva fase di scarico, sulla base di un determinato programma sperimentale.

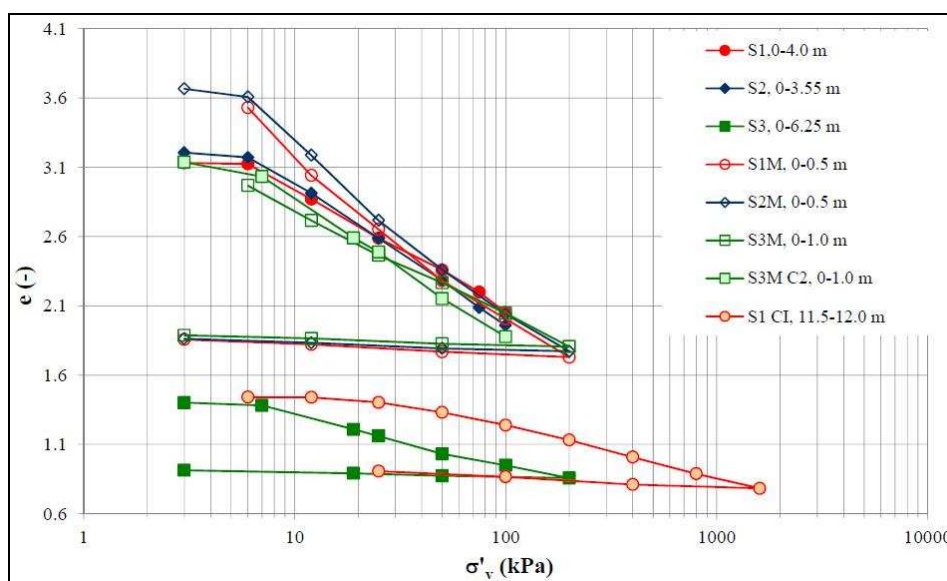


Figura 44

La Figura 45 mostra, la variazione dell'indice di compressione (C_c) in funzione della tensione verticale efficace (σ'_v). Si osserva che i dati, piuttosto coerenti tra loro, non sembrano risentire delle diverse tecniche di campionamento utilizzate (manuale o con carotiere a rotazione).

I campioni prelevati a mano lungo le verticali S1 ed S2, più plastici e meno sabbiosi, hanno indice dei vuoti iniziale più alto ed esibiscono maggiore compressibilità in carico dei provini S3M ed S3M C2. In particolare, i dati mostrano che l'indice di compressione C_c dei provini S1M ed S2M tende a ridursi al crescere del carico e diventa inferiore all'unità solo in corrispondenza di tensioni verticali efficaci superiori a 100 kPa. Similmente, anche i provini S1 (0-4.0 m) e S2 (0-3.55 m) esibiscono compressibilità in carico superiore a quella del provino S3 (0-6.25 m), coerentemente con la minore consistenza (Figg. 4.21 e 4.22) e maggiore plasticità (Figg. 4.21 e 4.25) ed attività (Fig. 4.26) che caratterizzano i primi due campioni, rispetto al terzo.

In Figura 45 è possibile osservare che, soprattutto nel caso dei provini più superficiali, l'andamento dell'indice di compressione (C_c) appare piuttosto irregolare, probabilmente spiegabile con l'evidente

disomogeneità del materiale, legata alla significativa presenza di resti bioclastici. I campioni più profondi, invece, dove la presenza di bioclasti si riduce notevolmente sin quasi ad annullarsi sono caratterizzati da un andamento più regolare dell'indice di compressione.

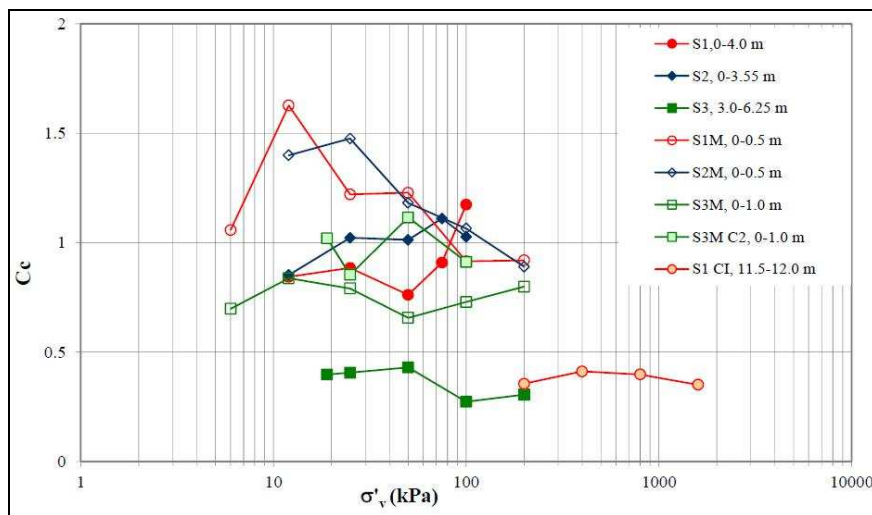


Figura 45. Indice di compressione, C_c , in funzione della tensione verticale efficace, σ'_v (i simboli pieni indicano campioni prelevati mediante carotiere; quelli vuoti, campioni prelevati a mano mediante sommozzatore. La profondità dei campioni è relativa al fondo del mare).

La Figura 46 mostra i valori dell'indice di rigonfiamento, C_s , in funzione della tensione verticale efficace, σ'_v . Essi sono piuttosto bassi e non mostrano tendenza a crescere al ridursi della tensione verticale efficace. Il valore più elevato è relativo al campione indisturbato S1 C1, caratterizzato da scarsa presenza di bioclasti, mentre i valori medi sono confrontabili tra i campioni prelevati manualmente e quelli prelevati con carotiere a rotazione.

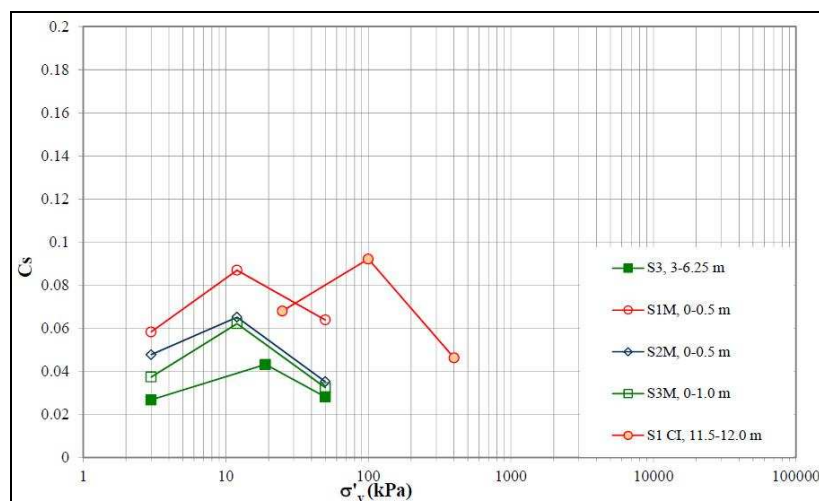


Figura 46. Indice di rigonfiamento, C_s , in funzione della tensione verticale efficace, σ'_v (i simboli pieni indicano campioni prelevati mediante carotiere; quelli vuoti, campioni prelevati a mano mediante sommozzatore. La profondità dei campioni è relativa al fondo del mare).

Inoltre, la Figura 47 mostra che, per tutti i provini, a parità di indice dei vuoti, la permeabilità in scarico è minore di quella in carico.

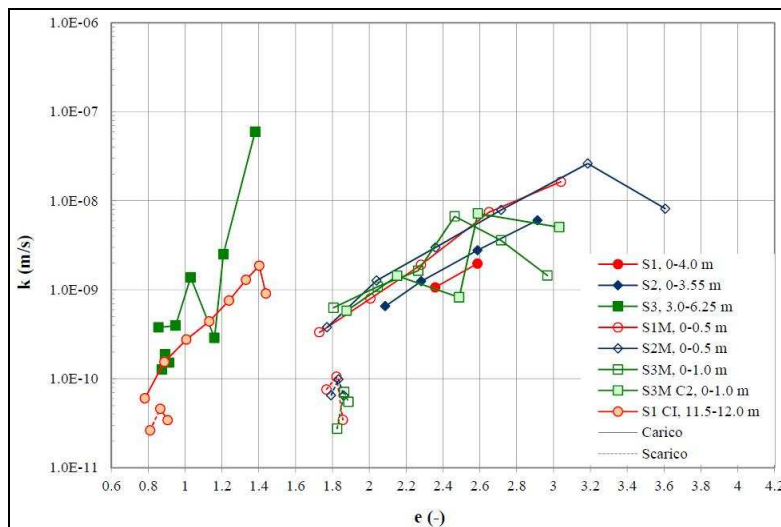
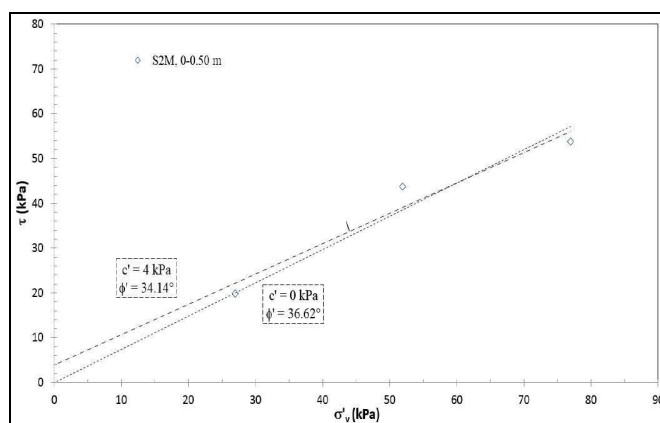


Figura 47. Coefficiente di permeabilità, k , in funzione dell'indice dei vuoti, e , nel piano bilogaritmico (i simboli pieni indicano campioni prelevati mediante carotiere; quelli vuoti, campioni prelevati a mano mediante sommozzatore. La profondità dei campioni è relativa al fondo del mare).

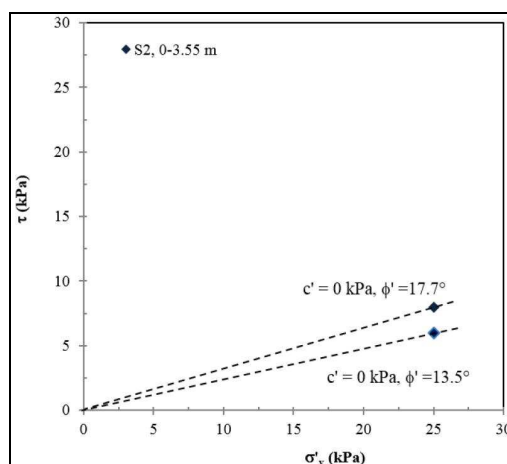
Si è, infine, osservato che, a parità di tensioni verticali efficaci, la rigidità edometrica in fase di carico è minore rispetto alla medesima in fase di scarico. Quest'ultima si riduce al decrescere delle tensioni verticali efficaci.

La prova di taglio diretto è stata effettuata su una terna di provini prelevati dal campione S2M (0-0.50 m) e su un provino prelevato dal campione S2 (0-3.55 m). Sperimentalmente sono state imposte una serie di carichi in sequenza durante la fase di consolidazione, che ha preceduto quella di taglio.

Nella Figura 48 sono mostrati i risultati delle prove di taglio diretto relative ai campioni S2M e S2. Nel primo caso si rilevano involuppi di resistenza con valori elevati dell'angolo di attrito, da imputare alla consistente presenza di bioclasti all'interno dei tre provini confezionati dal campione stesso ed alla loro interferenza sulla superficie di taglio. Nel secondo i risultati, come atteso, mostrano un più basso angolo di taglio, imputabile ad una minore presenza in questo provino di materiale bioclastico.



(A)



(B)

Figura 48. Risultati delle tre prove di taglio diretto effettuate (A) su tre provini del campione S2M (0-0.50 m) e (B) sul provino confezionato dal campione S2 (0-3.55 m).

2.6.5. Scenari stratigrafici di riferimento

I risultati delle analisi geofisiche indirette, volte ad individuare le sequenze litologiche in profondità al di sotto del fondale del 1° Seno, hanno evidenziato la presenza di ampi spessori di sedimenti olocenici, definiti sulla base delle loro caratteristiche “soffici”, giacenti, con contatto diretto, al di sopra dell’attuale tetto della formazione delle Argille Azzurre Subappennine.

Questi sedimenti appaiono avere spessore che varia nelle diverse porzioni del bacino, ma che può risultare anche spesso 10 – 20 m.

La presenza di questo potente strato di sedimenti a “bassa consistenza” è stata confermata anche dalle analisi dirette (paragrafo 2.6.4) condotte nella porzione Sud-Est del bacino. Queste indagini identificano il raggiungimento del tetto della formazione delle Argille Azzurre a non meno di 15 m di profondità al di sotto del fondale. Al di sopra i sedimenti olocenici appaiono avere contenuti d’acqua compatibili con una loro recente deposizione e “normal-consolidazione”, dunque prossimi al limite liquido, stanti i valori delle pressioni di confinamento. Il contenuto d’acqua e l’indice dei vuoti mostrano la presenza, nei primissimi 3-4 m al di sotto del fondale, di sedimenti a contenuto d’acqua ben al di sopra del limite liquido, evidenziando che, il primo strato dei sedimenti olocenici è rappresentato da sedimenti che risultano molto liquidi e, come tali, rappresentano lo strato di deposizione attuale, di contenuto d’acqua quasi doppio rispetto a quello degli altri sedimenti olocenici sottostanti. La presenza diffusa al fondo del 1° Seno di questo strato di consistenza “liquida”, appare coerente con i risultati delle indagini geofisiche (*sub-bottom profiler*), che dovrebbero aver identificato uno strato di solo 2-3 m di sedimenti superficiali.

Ci si deve dunque attendere che, complessivamente, i sedimenti olocenici al fondo del I Seno del Mar Piccolo esibiscano elevatissime compressibilità e bassissime resistenze.

Circa la composizione dei sedimenti olocenici, i dati di caratterizzazione disponibili, compresi quelli derivanti da studi pregressi farebbero ipotizzare una rilevante variabilità nelle diverse porzioni di fondale del 1° Seno (Figura 49). In particolare, per i primi 50 cm di spessore del sedimento, risulta dominante la presenza di argilla (frazione argillosa CF \geq 40-50%) sia nella porzione ridossata Nord / Nord-Ovest, sia nella porzione Sud-Est. Nella porzione Nord-Est, immediatamente off-shore rispetto agli affioramenti alluvionali recenti, e nella porzione di fondale che si estende dal centro verso Sud-Ovest, appaiono dominanti i limi (frazione limosa dominante, limo \geq 60%) che risultano associati ad argilla nelle porzioni più a Nord, mentre si arricchiscono in sabbia (con il ridursi della frazione argillosa) nella zona centrale e Sud-Ovest. Limi sabbiosi e sabbie limose appaiono dominare in zone vicine ai canali di comunicazione con il 2° Seno o con il Mar Grande, dove l’energia di circolazione e turbolenza dell’acqua è, evidentemente, maggiore.

Al di sotto dei 50 cm di profondità, entro i primi 2-3 m, la composizione del sedimento sembra rimanere invariata, o aumentare in frazione argillosa. E’ presumibile che a profondità maggiori di 3 m, per le quali si hanno ad oggi solo i dati della caratterizzazione geotecnica delle tre stazioni eseguite dal Politecnico di Bari in Area 170 ha, il sedimento si arricchisca ovunque in argilla. In profondità, il sedimento olocenico appare avvicinarsi sempre di più ad una forma rimaneggiata, o risedimentata, dell’Argilla Azzurra presente, come formazione geologica in sede, al di sotto del sedimento olocenico. I sedimenti limosi e sabbiosi derivano presumibilmente dalla risedimentazione, in zone di minore quiete del bacino, del trasporto solido meno fine derivato dall’erosione delle formazioni limoso - argillose o calcaree affioranti nelle zone interne, per cui si può presumere si tratti di limi e sabbie di natura carbonatica.

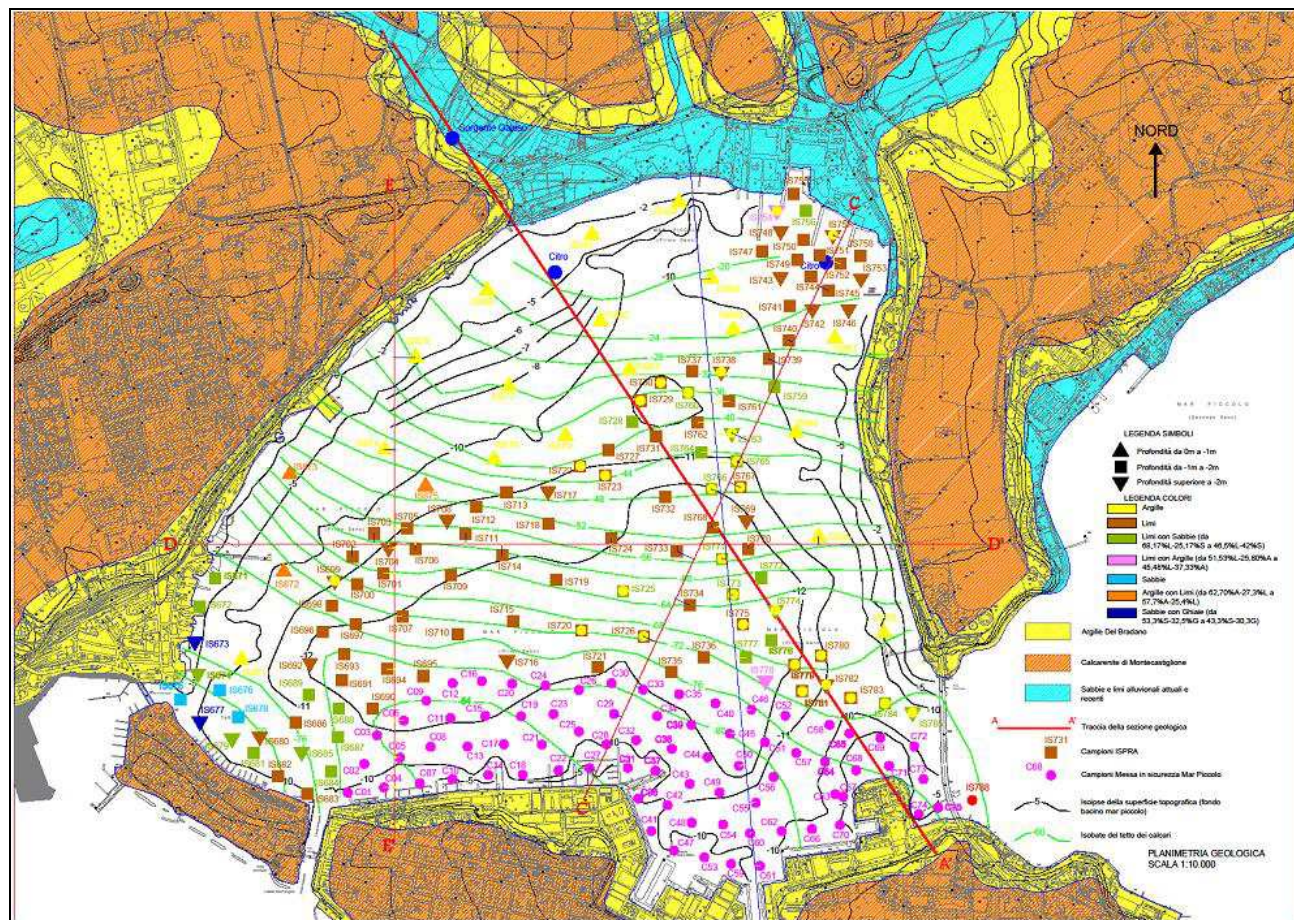


Figura 49. Andamento granulometrico dei primi 50 cm di sedimento caratterizzato nel 1° Seno del Mar Piccolo.

Sulla base dei dati sopraesposti e della letteratura disponibile, nonché di studi condotti dal Politecnico di Bari negli anni passati, si è dunque cercato di ricostruire un modello geotecnico rappresentativo dell'area del 1° seno.

Per quanto riguarda le Argille Azzurre Subappennine dell'arco tarantino esse sono, in generale, costituite da argille (frazione argillosa $CF \geq 30-40\%$) illitiche, fortemente limose (limo carbonatico), classificabili come argille da media ad alta plasticità, di attività medio-bassa, fortemente sovra consolidate, caratterizzate da compressibilità bassa (nel tratto di ricomprensione che precede lo stato di preconsolidazione), ed a comportamento dilatante e rammollente se sottoposte a carico a taglio. Per rappresentare i caratteri geotecnici di questa formazione di base si è fatto riferimento alle proprietà geotecniche misurate per le argille campionate nel sito *Pappadai* (bacino di Montemesola) e sottoposte a sperimentazione negli anni passati da parte del Politecnico di Bari, sia nella condizione indisturbata, sia dopo ricostituzione e normalconsolidazione monodimensionale da alti contenuti d'acqua in laboratorio.

L'altro litotipo che risulta abbastanza diffuso sull'area è il limo, che può presentarsi da argilloso a sabbioso e per il quale non si dispone di alcuna misura diretta sia dei caratteri di plasticità sia delle proprietà meccaniche. Pertanto si è fatto riferimento a dati presenti in una ricerca condotta sempre da parte del Politecnico di Bari su un limo argilloso-sabbioso ricostruito in laboratorio, avente granulometria che rientra tra quella misurata dalla caratterizzazione condotta nel 2008, composto da limo carbonatico al 60%, frazione argillosa al 25% e sabbiosa al 15%, con indice di plasticità 25% ed indice di attività elevato, come emerso dai campioni provenienti dalle stazioni S1 e S2 precedentemente citate.

Infine, anche per le sabbie, si è fatto riferimento a dati acquisiti in altri siti e che presentano caratteristiche e comportamento simile a quello dei sedimenti caratterizzanti il 1° Seno. In questo caso i riferimenti di

letteratura sono stati la sabbia carbonatica di origine organogena originaria della Dogs Bay (Coop, 1990) e la sabbia del sito Chattahoochee (Vesic & Clough, 1968).

In Tabella 8 sono riassunti gli indici geotecnici ed i parametri meccanici e di permeabilità che si ritiene possano essere di riferimento per la fase di modellazione di scenari rappresentativi del sottosuolo.

Sedimento	codice	CF %	M %	S %	LL %	IP %	A	e_0	σ'_v kPa	C_s, C_c	ϕ'_{cs}	K_{0NC}	K m/s
										(x-xxkPa)			
Limo arg.sab.	A	25	53	22	47	24	1	2,4	3	0,85 (3-30)	30	0,5	E-08
								1,55	30	0,6 (30-300)			
Argilla Azzurra Ricostituita	B1	58	42	0	63	35	0,6	1,6	26	1,5 (3-26)	23	0,57	E-09
								1,1	200	0,5 (26-200)			
Argilla (POLIBA)	B2	52	40	9	70	45	0,9	3,2	10	1,2 (3-300)	23	0,57	E-08
Sabbia Dogs Bay	S1							2,6	26	0,77		0,51	E-04
Sabbia Ch.	S2							1	1000	0,4			E-04
Argilla Azzurra naturale	Base	58	42	0	63	35	0,6	0,88	100	0,04	27,38		E-10

Tabella 8. Parametri geotecnici dei sedimenti di riferimento nella definizione degli scenari di modellazione nel 1° Seno del Mar Piccolo.

2.6.6. Scenari stratigrafici e corrispondenti modelli geotecnici

Nella definizione di linee di indirizzo alla modellazione geotecnica dei terreni che costituiscono il sottosuolo del I Seno del Mar Piccolo, si fa qui riferimento alla sezione A-A', riportata nella precedente Figura 49 (Paragrafo 2.6.5) e di seguito esplicitata in relazione ai rapporti stratigrafici (Figura 50).

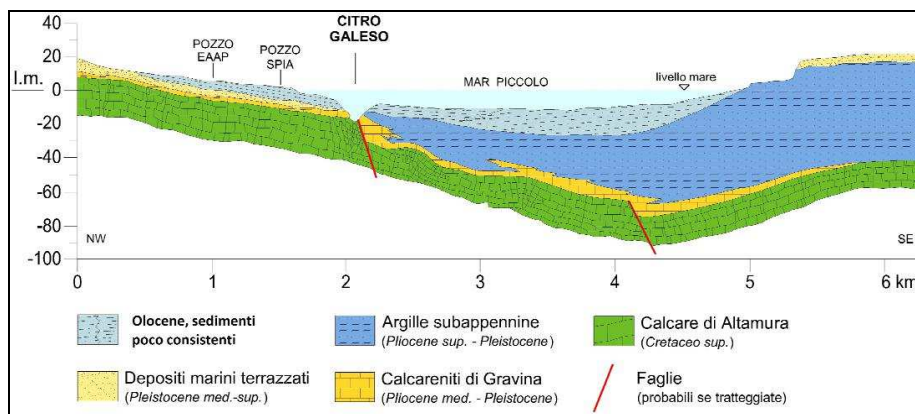


Figura 50. Sezione geologica A-A'.

Ogni modellazione bidimensionale dovrà infatti configurare il più fedelmente possibile l'andamento del letto delle Argille Azzurre di base, identificato tramite indagini indirette per la sezione qui di riferimento. Tale letto, definito dal contatto di base tra la formazione delle Argille Azzurre e le sottostanti Calcareniti di Gravina (o direttamente il Calcare di Altamura), può infatti rappresentare il *bedrock*, ritenendosi pressoché rigido. La modellazione sia le Argille Azzurre in sede, ma tanto più i sovrastanti sedimenti olocenici molto

deformabili, configura, invece, i materiali soggetti alle deformazioni che generano i cedimenti (positivi o negativi) del fondale.

Un altro aspetto da tener presente è quello relativo alla falda profonda (presente nei calcari cretacei al fondo) ed ai conseguenti carichi piezometrici. Al fondo del 1° Seno si può assumere che la falda nei calcari sia confinata al tetto dalle Argille Azzurre, che presentano una differenza di carico tra il letto delle Argille Azzurre ed il fondale di circa 1 m (Δh). Tale differenza di carico, dunque, alimenta componenti di flusso attraverso le Argille Azzurre ed i sedimenti olocenici che, anche se modeste, sono verso l'alto ed incidono sulle pressioni efficaci e le condizioni deformative all'interno della sequenza di sedimenti. Tali condizioni possono essere modificate da interventi sul fondale che possano in qualche modo modificare la permeabilità propria dei sedimenti e vanno, pertanto, implementate nella modellazione geotecnica di riferimento.

Nella modellazione del pacco di terreni al di sotto del fondale va ritenuta di estrema importanza anche l'implementazione delle eterogeneità laterali rilevate nei sedimenti olocenici.

La Figura 51 illustra un possibile modello bidimensionale della sequenza stratigrafica al di sotto del fondale del 1° Seno, facendo riferimento alle porzioni di bacino ove i sedimenti olocenici assumono maggiore spessore (es. zona centrale della sezione AA').

Il modello configura un'area di circa 200 m di larghezza, dove il *bedrock* calcareo, assunto come bordo meccanico fisso, è sede di un carico idraulico costante $h=13$ m (a partire da una quota geodetica di riferimento $z=0$), mentre al tetto del modello $h=12$ m, pari al battente d'acqua definito dal livello mare (fondo del mare nella zona centrale posto a 12 m sotto il livello mare). Quindi, nel modello si assume una differenza di carico tra il bordo di base e quello superiore di testa di 1 m.

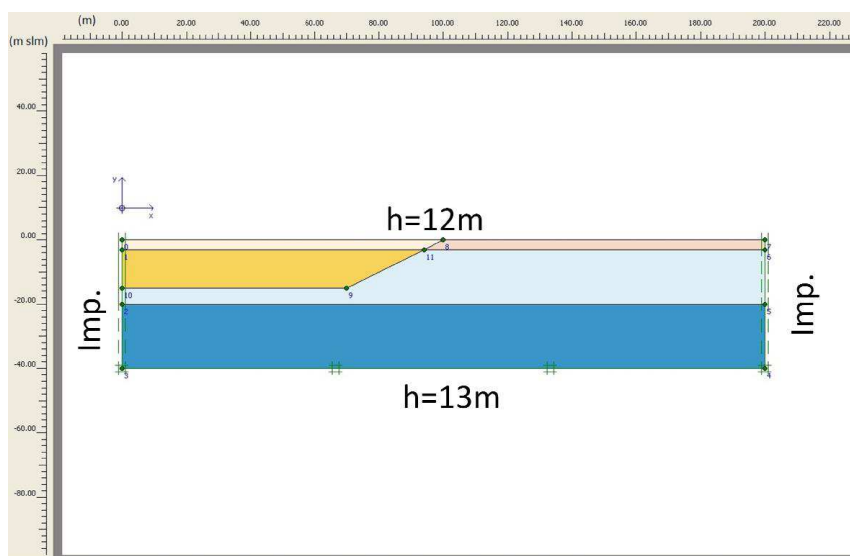


Figura 51. Modello geotecnico bidimensionale di una porzione centrale del fondale del 1° Seno del Mar Piccolo.

Al di sopra del *bedrock* il modello configura 5 *cluster* differenti per i sedimenti olocenici: due superficiali di 3 m, il cui bordo superiore configura l'attuale fondale, con consistenza più bassa rispetto a quelli sottostanti, e tre inferiori di spessore 20 m, di cui uno rappresentato dai sedimenti olocenici, con evidenziata un'eterogeneità sia laterale sia verticale, e l'altro dalle Argille Azzurre di base.

In Figura 52 sono indicati diversi scenari di modellazione sulla base del modello rappresentato in Figura 51. In questi i *cluster* dei sedimenti olocenici sono la diversa combinazione dei sedimenti con caratteristiche riportate nella precedente Tabella 8.

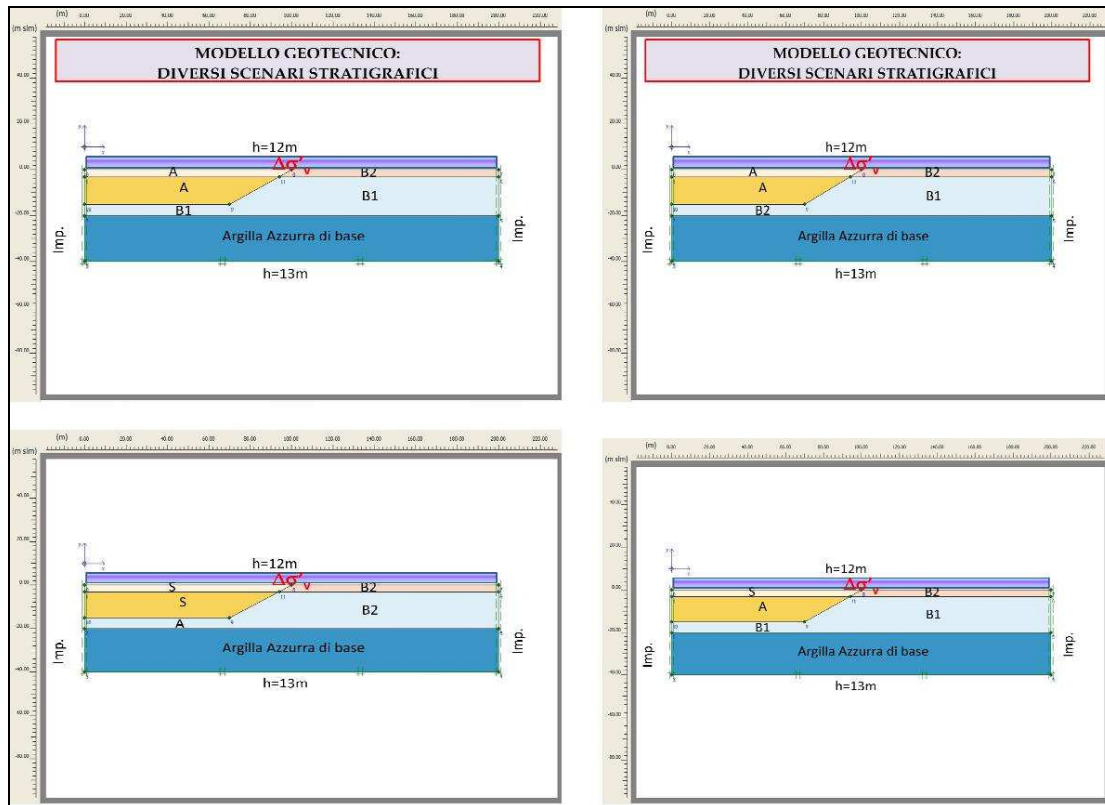


Figura 52. Scenari geotecnici di riferimento per il fondale del 1° Seno del Mar Piccolo.

In generale, il modello potrà essere tanto più rappresentativo quanto più estesa sarà la larghezza del modello bidimensionale e passando ad una modellazione 3D.

Un altro aspetto da considerare nella modellazione proposta è l'esistenza di bordi laterali meccanicamente fissi ed impermeabili che vincolano, lateralmente, le potenziali deformazioni. Qualora ciò non fosse, nel modello dovranno essere opportunamente considerate le deformazioni laterali che si svilupperanno nei sedimenti olocenici altamente deformabili (a seguito di carico/scarico verticale).

2.7. STATO DI QUALITÀ (CHIMICA) DEI SEDIMENTI

La presenza e distribuzione di contaminanti nei sedimenti del Mar Piccolo è stata già da tempo individuata e contestualizzata. Tra il 2005 ed il 2009 gli Uffici del Commissario Delegato per l'emergenza rifiuti in Puglia prima (Rif.Doc. ICRAM Progetto Preliminare di Messa in sicurezza d'emergenza Mar Piccolo di Taranto Area 170 ha-Relazione tecnica, 2005) e del Commissario Delegato per l'Emergenza Ambientale in Puglia poi (Rif.Doc. ISPRA CII-EL-PU-TA-Mar Grande Il Lotto e Mar Piccolo-01.06, Agosto 2010), hanno eseguito, all'interno del perimetro del Sito di bonifica di Interesse Nazionale di Taranto (D.M. 10 gennaio 2000 recante il decreto di perimetrazione, pubblicato in G.U. n. 45 del 24/02/2000), le caratterizzazioni ambientali finalizzate alla messa in sicurezza e bonifica dell'area.

Complessivamente il quadro ambientale emerso ha evidenziato una presenza di contaminanti organici e metalli pesanti su varie aree del bacino del Mar Piccolo. In particolare, per l'area a sud del 1° seno (la così detta "Area 170 ha"), una contaminazione prevalente da PCB, Arsenico e Mercurio, e per il restante bacino una presenza cospicua di Mercurio, Rame, in misura minore Zinco e Piombo, nonché di PCB e Idrocarburi totali, uniti a PCDD, PCDF e PCB diossina simili (T.E.), soprattutto nel 1° seno.

A scopo di esempio, nelle figure seguenti si riportano alcune delle cartografie relative gli esiti analitici delle caratterizzazioni.

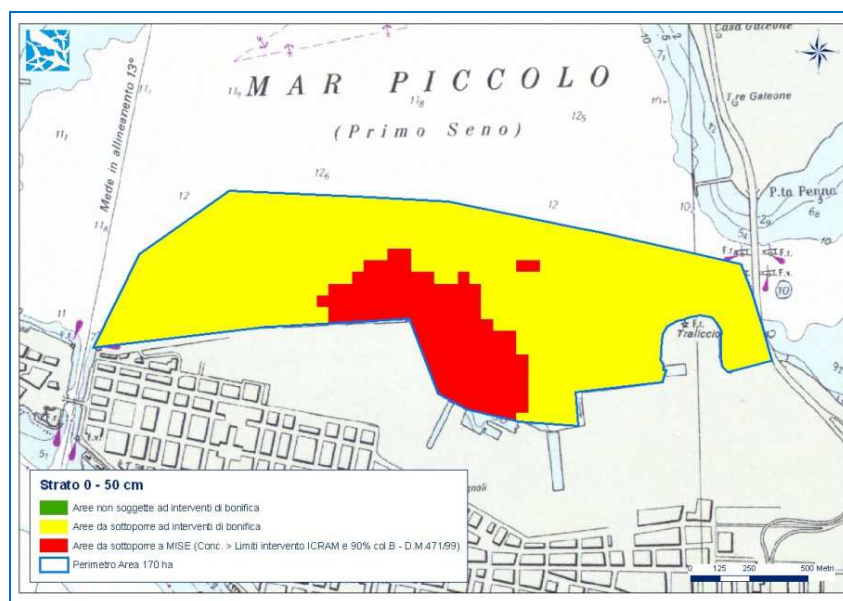


Figura 53. Elaborazione geostatistica dello stato di contaminazione complessivo dello strato 0-50 cm per l'Area 170 ha (2005).

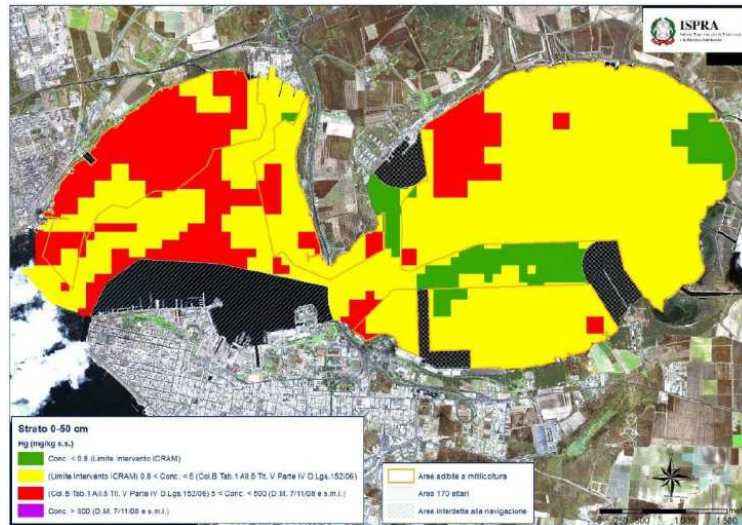


Figura 54. Elaborazione geostatistica delle concentrazioni di Mercurio per lo strato superficiale 0-50 cm (2010).

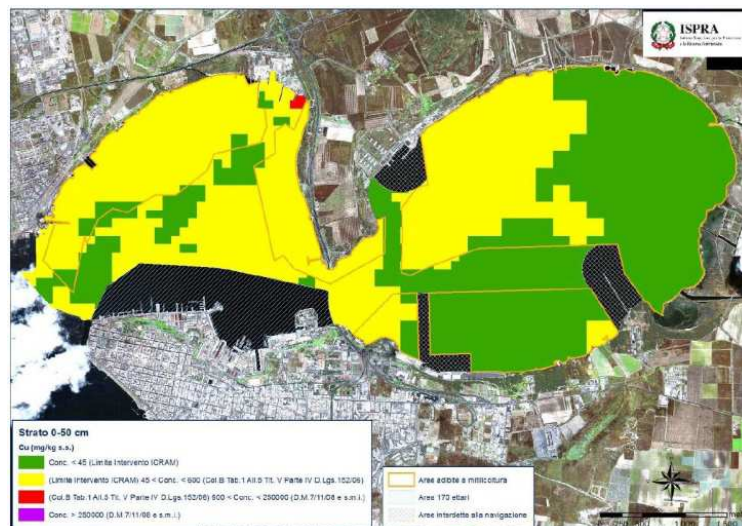


Figura 55. Elaborazione geostatistica delle concentrazioni di Rame per lo strato superficiale 0-50 cm (2010).



Figura 56. Elaborazione geostatistica delle concentrazioni di PCB per lo strato superficiale 0-50 cm (2010).



Figura 57. Elaborazione geostatistica delle concentrazioni di Idrocarburi totali per lo strato superficiale 0-50 cm (2010).

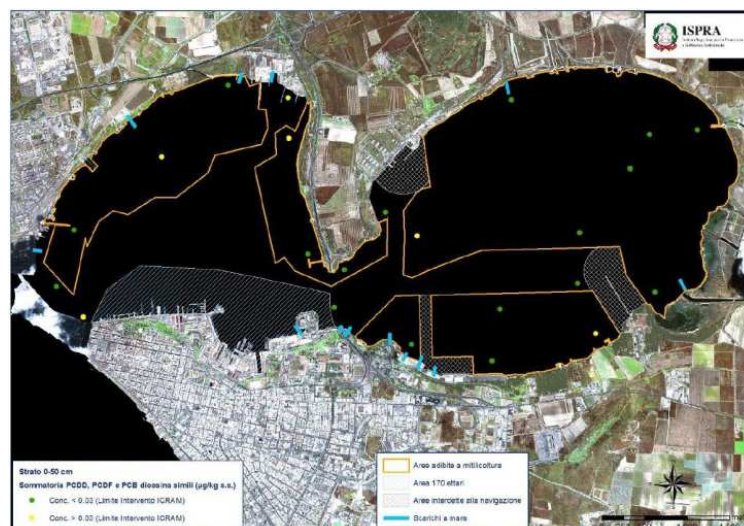


Figura 58. Concentrazioni di Diossine e PCB Diossina-simili nello strato superficiale di sedimento (2010).

Posizione	PCDD/F ppt ng WHO-TE/Kg s.s.	DI-PCB ppt ng WHO-TE/Kg s.s.	TEQ ppt ng WHO-TE/Kg s.s.	PCB* ppb µg/kg s.s.
TA04/0458	1,50	1,74	3,24	56,43
TA04/0631	1,13	0,72	1,85	12,35
TA04/0683	49,93	137,25	187,18	5247,47
TA04/0757	29,90	134,35	164,25	3145,58
TA04/0814	24,41	120,89	145,30	2590,91
TA04/0870	5,11	0,90	6,01	18,24
TA04/0872	63,43	44,43	107,86	633,74
TA04/0891	7,17	8,27	15,44	118,96
TA04/0927	1,37	0,55	1,92	6,67
TA04/0995	8,27	9,89	18,16	174,98

Valori d'intervento ICRAM

30

190

* Somma PCB: 28, 52, 77, 81, 95, 99, 101, 105, 110, 118, 126, 128, 138, 146, 149, 151, 153, 156, 169, 170, 177, 180, 183, 187.



SEDIMENTS: larger dots represent increasing concentrations.

	PCDD/F ng WHO-TE/Kg dw	di-PCB MIN-MAX	Total TEQ MIN-MAX	Total PCB µg/Kg dw
Mar Piccolo	1,1 – 63,4	0,6 – 137,3	1,8 – 187,2	6,7 – 5247,7

Figura 59. Esiti delle analisi svolte da ARPA Puglia sui campioni prelevati durante la caratterizzazione del 2009 allo scopo di validazione.

Per quanto riguarda la presenza di PCB, PCDD/F, Diossine e PCB diossina-simili nei sedimenti, anche i dati dei monitoraggi regionali dei corpi idrici superficiali (acque di transizione) ai sensi del D.M.56/2009, condotti da ARPA Puglia, hanno reso per il Mar Piccolo una condizione di criticità, maggiormente evidente per il 1° seno, se paragonate alle concentrazioni rilevate per gli altri ambienti di transizione regionali (Figura 60).



Figura 60. Stazioni di monitoraggio ai sensi del D.M. 56/2009 per gli ambienti di transizione in Puglia.

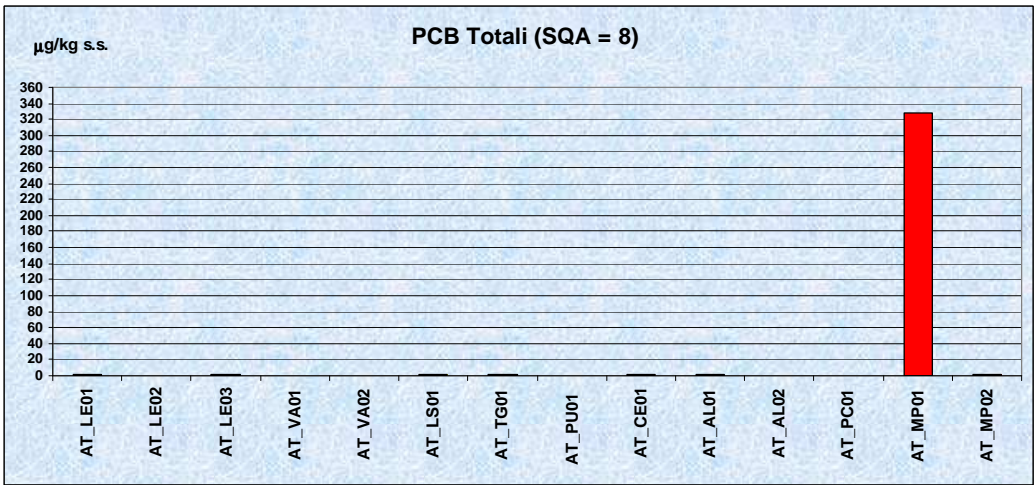


Figura 61

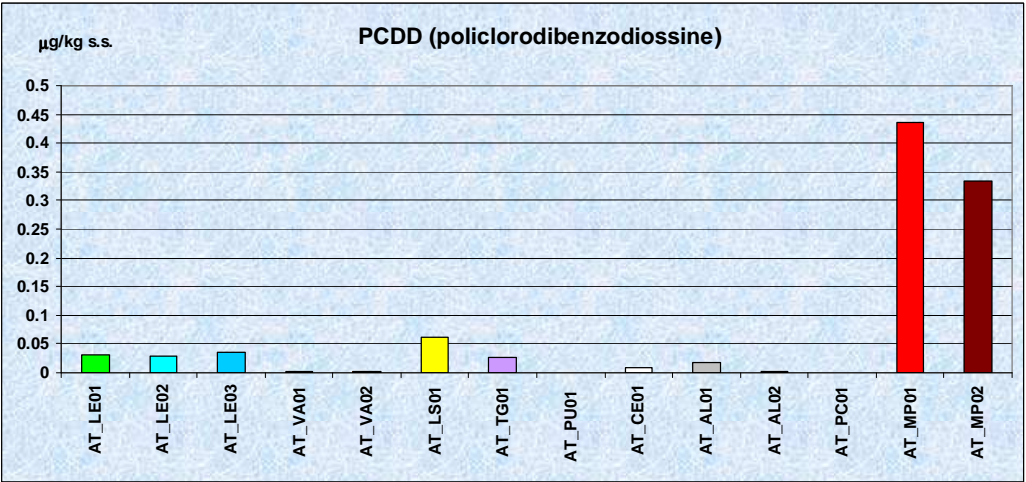


Figura 62

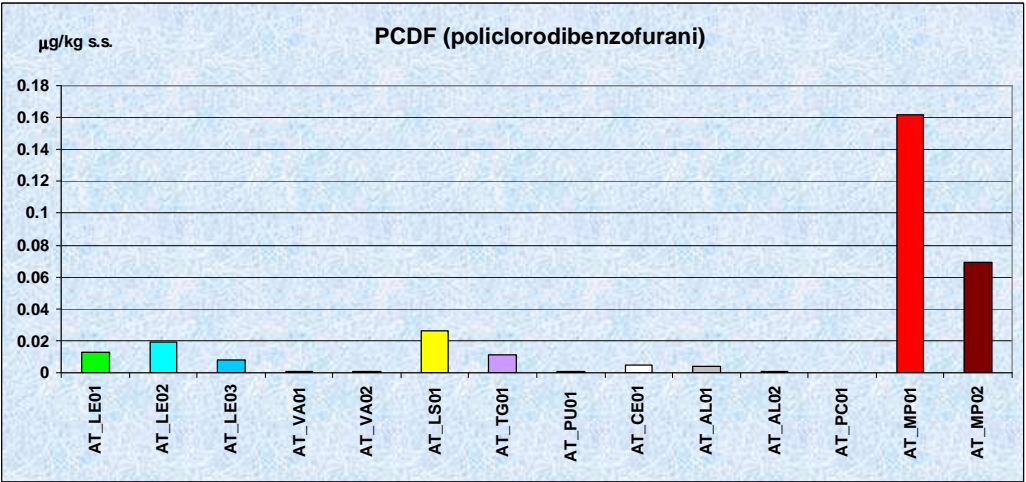


Figura 63

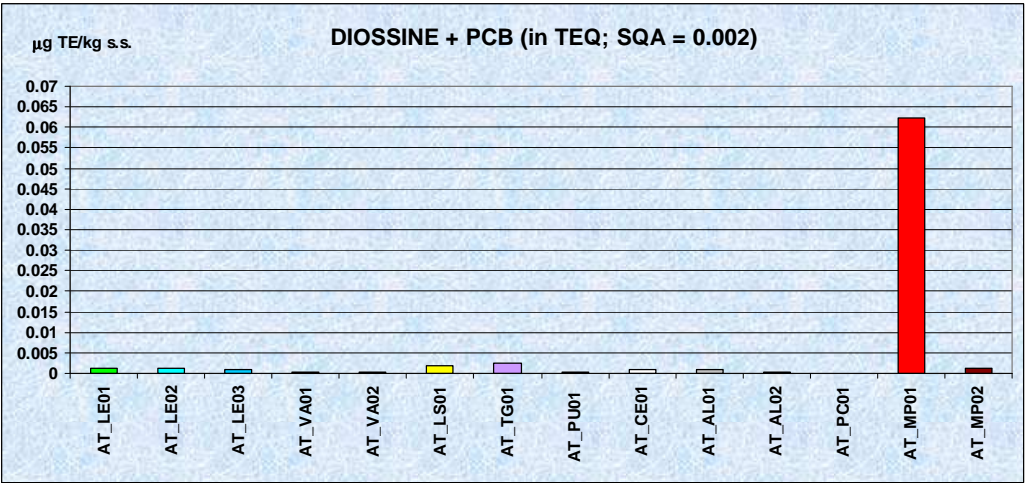


Figura 64

3. FONTI DI CONTAMINAZIONE

3.1. FONTI PRIMARIE (APPORTI TERRIGENI)

3.1.1. Mappatura delle anomalie termiche per le acque del Mar Piccolo (a cura del CNR IRSA di Bari)

La presente attività ha riguardato l'esecuzione di rilievi *da remoto* delle caratteristiche termiche delle acque superficiali dei due bacini del Mar Piccolo, impiegando in maniera congiunta sensori multispettrali e termici per la definizione di mappe di temperatura, con particolare riferimento al 1° seno, area in cui sono emerse le maggiori criticità ambientali.

L'obiettivo è stato quello di rilevare la presenza di eventuali anomalie termiche legate alla presenza di sorgenti subacquee (citri) o di afflussi da terra (scarichi), potenziali vie di diffusione ancora attive di contaminanti.

In generale l'impiego del telerilevamento ambientale, come tecnica di supporto alle tradizionali rilevazioni (campionamenti) a terra ed in mare, consente di ottenere dati ed informazioni georeferenziate su scala sinottica in grado quindi, di comprendere i fenomeni a scala maggiore e di implementarli anche all'interno di un Sistema Informativo Geografico (GIS).

Per eseguire l'opportuna correzione e taratura delle immagini telerilevate, in contemporanea con la loro acquisizione, il 14 giugno 2013 è stata realizzata una campagna di rilievi di temperatura e conducibilità (mediante sonda CTD Hanna HI9835) direttamente in mare, al fine di calibrare le informazioni telerilevate, acquisire il dato misurato ed eseguire una valutazione qualitativa sulla possibile origine delle acque aventi differente temperatura (acque dolci/salmastre). Tale attività di campo è stata eseguita grazie anche al supporto della Capitaneria di porto di Taranto – Sezione Demanio Ambiente e del Dipartimento provinciale di Taranto dell'ARPA Puglia. Si fa presente che la navigazione nel 1° seno è risultata alquanto difficile perché intralciata dalla presenza di strutture di supporto all'allevamento di mitili spezzate e, a volte, liberamente galleggianti che potevano compromettere la navigazione stessa in caso di impatto accidentale.

Operativamente sono stati pianificati ed eseguiti una serie di sorvoli aerei sull'area di studio (n. 14 strisciate), integrati con sistemi inerziali e DGPS, impiegando una camera termica (modello *Thermal Airborne Broadband Imager* – TABI 320, risoluzione spettrale in banda 8-12 μm , variazioni di temperatura del decimo di grado e risoluzione spaziale, in relazione alla quota di volo, è di circa 1.5 m) ed un sensore iperspettrale (modello *Compact Airborne Spectrographic Imager* – CASI 1500; Campo di vista 40° *across-track*; Range di sensibilità spettrale 380nm – 1050nm [670nm] ovvero dall'UV – visibile all'IR vicino; Numero di bande fino a 288; Risoluzione spettrale banda 2.4nm FWHM; Campo di vista istantaneo IFOV 0.49 mRad; Pixel x linea 1500; Risoluzione radiometrica 16384:1 (14 bits); risoluzione spaziale (in funzione della quota di volo) tra 0,25 e 1,5 metri) tra loro sincronizzati in modo da acquisire informazioni sia sulle proprietà riflesse dell'area perlustrata sia sulle proprietà emissive delle superfici osservate.

I sistemi descritti sono completati da un sistema integrato DGPS ed inerziale che, in abbinamento con un opportuno numero di GPS a terra, produce le informazioni ausiliarie di assetto del velivolo (*head sensor*) durante l'acquisizione, necessarie nell'elaborazione e produzione di ortoimmagini planimetricamente accurate $\sigma \pm 1$ pixel, che risultano integrabili con le ortofoto digitali prodotte. Le immagini acquisite da ambedue i sensori sono state registrate in formato digitale su hard disk rimovibili permettendo la rapida ed immediata integrazione delle stesse su database geografici in stazioni di elaborazione dati per IP e GIS. I dati grezzi sono stati opportunamente georeferenzati. La configurazione utilizzata e la rappresentazione delle varie strisciate eseguite è illustrata schematicamente in Figura 65. I parametri di volo utilizzati sono stati i seguenti: rilievi eseguiti nelle date 03/03/2013, 06/04/2013 e 15/06/2013; sensore iperspettrale VNIR CASI-1500 e sensore termico TABI-320 della Itres; totale strisciate acquisite: 14 CASI + 14 TABI; sovrapposizione laterale: 15%; N° bande acquisite con il sensore iperspettrale CASI: 32; quota di volo: 615 metri; velocità: 125 nodi; direzioni di volo: 91° e 271°; risoluzione spaziale CASI: ~0,40 m; risoluzione spaziale TABI: ~1,50 m.

I dati acquisiti sono stati successivamente georiferiti (sistema di riferimento nazionale WGS84 UTM 33), e sono stati oggetto di specifiche elaborazioni finalizzate alla mappatura degli scarichi potenziali, al fine di

poter essere riprodotti su specifico *layer* fruibile con il software *Perimsiti* (in dotazione ad ARPA Puglia), su comuni piattaforme GIS (*OpenGIS – ArcGis*, etc.) e direttamente su *Google Earth*; in questo modo è possibile un riscontro puntuale e si può fruire delle stesse informazioni sovrapponendole ad altri livelli informativi.

A seguito della georeferenziazione delle strisciate è stata eseguita una prima elaborazione speditiva dei dati telerilevati, che ha dato luogo ad una preliminare mappatura delle principali anomalie termiche da cui emergono delle situazioni riferibili alla presenza dei Citri, ma anche di impluvi e di scarichi, oltre alla perturbazione termica generata dalla idrovora ILVA (Figura 66). A seguito di questa prima elaborazione sono state individuate le anomalie termiche alcune delle quali, in fase di elaborazione finale, non sono state confermate.

Tali punti, sono stati comunque individuati e georiferiti, al fine di poter condurre in futuro ulteriori verifiche ed approfondimenti, se ritenuti d'interesse (Figura 67).

Le informazioni acquisite sono state messe a confronto con le riprese effettuate dalla Capitaneria di porto di Taranto e dal Comando generale del Corpo delle Capitanerie di Porto - Reparto 3° – Ufficio 2° - 2ª Sezione Operazioni Aeree, che hanno operato con un sistema multispettrale *Sensytech AA1268 ATM*.

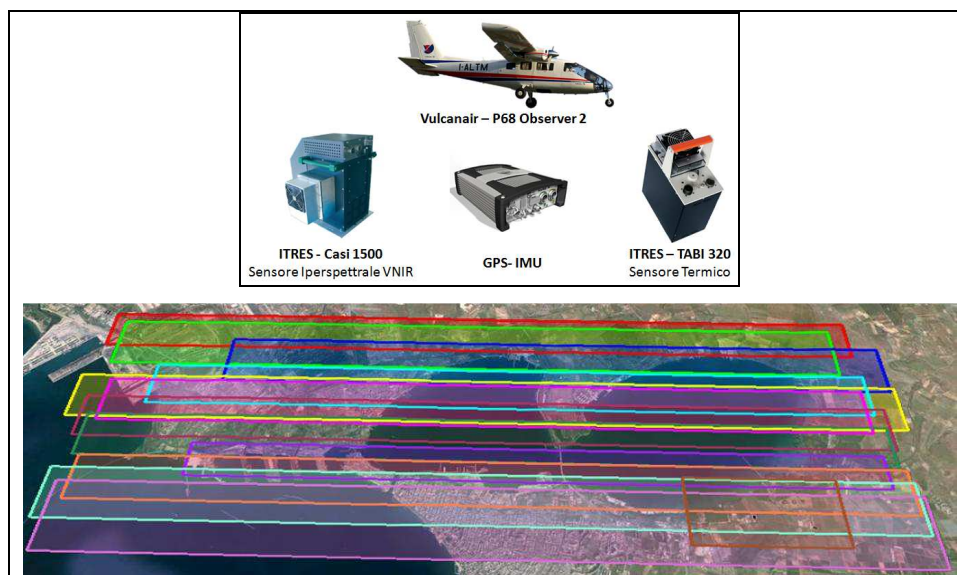


Figura 65. Configurazione schematica dei sistemi di acquisizione impiegati e delle strisciate eseguite.

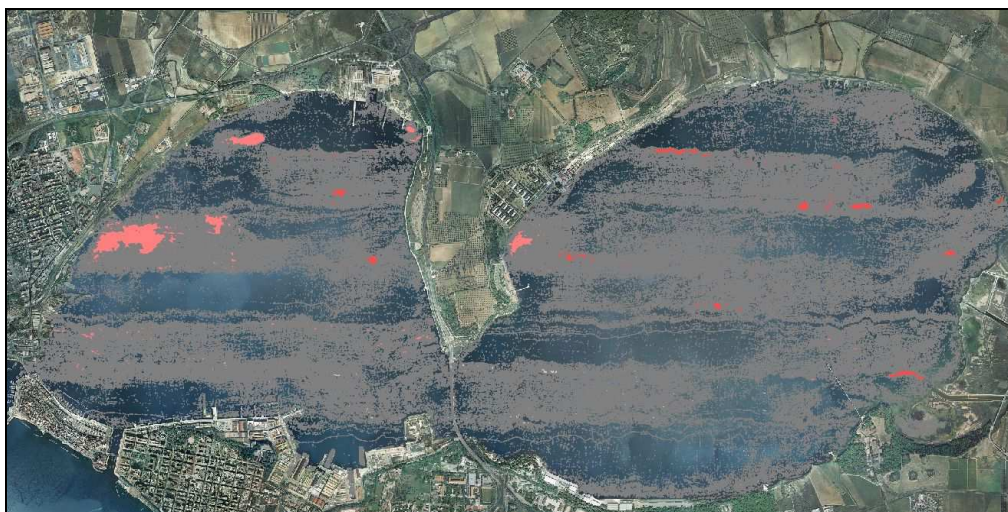


Figura 66. Mappa relativa alla pre-elaborazione delle immagini telerilevate.



Figura 67. Localizzazione dei punti “anomali” su cui eseguire ulteriori approfondimenti.

Attività di sopralluogo lungo la costa del Mar Piccolo

Dall’analisi delle anomalie termiche rilevate in via preliminare, e delle ortofoto ed immagini aeree disponibili, è stata effettuata una valutazione sulle aree costiere in cui effettuare sopralluoghi di approfondimento (Figura 68), che sono stati in seguito realizzati il 15 luglio 2013. La finalità di queste attività è stata quella di reperire informazioni utili alla descrizione dei punti considerati, per esempio canali artificiali o impluvi naturali, la prossimità di sorgenti calde naturali e la possibilità di fungere da vie di trasporto superficiale di inquinanti provenienti da fonti di contaminazione (diffusa o puntiforme) ancora attive. Non è stato possibile censire le zone di costa sotto giurisdizione della Marina Militare (zona Arsenale). Anche in questo caso i dati dei rilievi eseguiti sono stati inseriti nel GIS in modo da poter essere successivamente consultati, integrati con le altre informazioni, per valutazioni di carattere generale.



Figura 68

Elaborazione e risultati dei dati telerilevati

La fase di post-elaborazione dei dati remoti è stata approntata basandosi sull’utilizzo di due software: ENVI e GRASS. Il primo, specifico per l’elaborazione dei dati telerilevati, ha permesso la chiara identificazione delle anomalie termiche superficiali delle acque del Mar Piccolo e di evidenziarle visivamente con tecniche

di stretching dell'immagine e o di *density slicing*. Le elaborazioni del GRASS, oltre a confermare i risultati del software ENVI, soprattutto per quel che concerne le zone in mare aperto interessate dalla presenza di polle sorgentizie (Citri Galeso, Citrello, Le Copre e Mascione), hanno messo in evidenza la distribuzione delle anomalie termiche, sia calde che fredde, in altre zone di mare aperto e soprattutto lungo la costa. Si è dunque proceduto alla verifica della natura ed origine di queste anomalie e si è constatato che spesso a queste aree corrispondono gli sbocchi degli scarichi censiti, mentre altre volte dipendono dalla presenza delle foci di fiumi e sbocchi di canali ed in un caso alla presenza delle saline nei pressi della palude La Vela.

Sono stati, inoltre, eseguiti dei controlli incrociati tra i risultati di post-elaborazione con precedenti elaborazioni derivanti da precedenti voli eseguiti in anni passati, in particolare: volo MIVIS effettuato dal CNR in data 23/05/2009 e volo con sistema multispettrale *Sensytech* AA1268 ATM effettuato in data 27/11/2011 dal Comando generale del Corpo delle Capitanerie di Porto - Reparto 3° – Ufficio 2° - 2ª Sezione Operazioni Aeree.

In aggiunta sono state opportunamente filtrate alcune anomalie termiche introdotte da galleggianti, relitti, boe, cisterne, etc.

In Figura 69 è riportata la mappa con l'indicazione delle isolinee relative alle aree di influenza delle anomalie termiche rilevate. Le immagini in scala di grigio sono tagli effettuati sull'immagine di partenza al fine di evidenziare le maggiori anomalie termiche dovute a polle sorgentizie che sono visivamente riscontrabili dai dati TABI. Le isolinee corrispondenti nell'elaborazione di GRASS forniscono informazioni sulle aree superficiali di mare influenzate dalla presenza dell'anomalia termica calda o fredda. Le isolinee disegnate hanno un'equidistanza di 0.25°C.

Si precisa che la posizione delle anomalie rilevate in superficie non necessariamente corrisponde alla presenza delle stesse sul fondale tracciandone la perpendicolare; stesso discorso può essere fatto per la "forma" che assumono in superficie perché notevolmente influenzata dalle correnti sottomarine e superficiali.

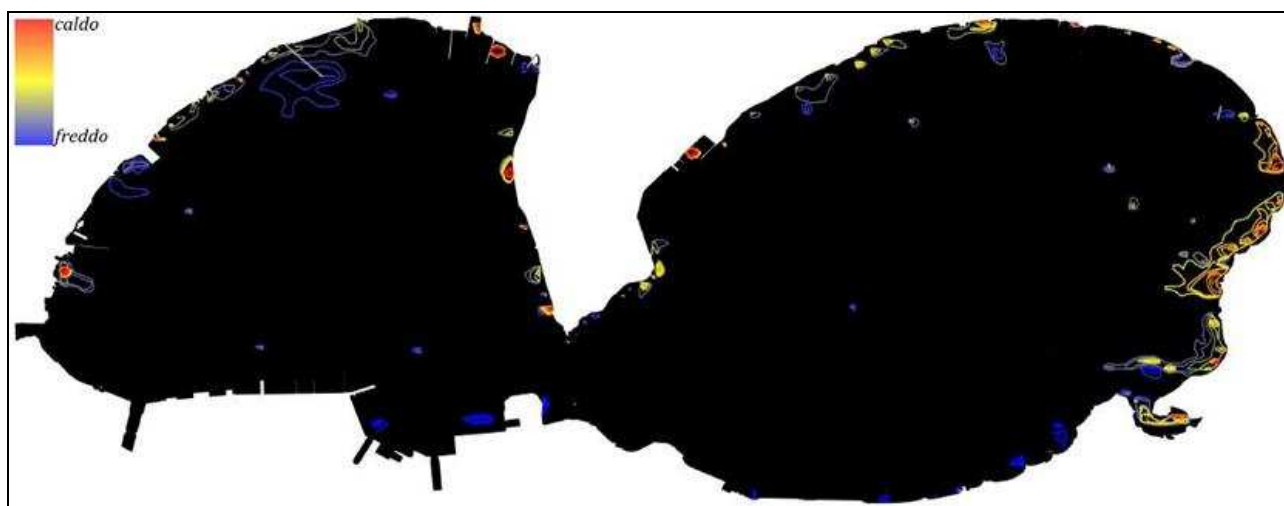


Figura 69. Mappatura complessiva delle anomalie termiche riscontrate nel Mar Piccolo.

3.1.2. Campionamento integrativo delle acque del 1° Seno del Mar Piccolo (a cura di ARPA Puglia)

Nell'ambito del Programma di lavoro definito da ARPA, l'Agenzia ha avuto in carico l'esecuzione di un *campionamento integrativo della matrice acqua* in alcuni punti tra quelli che apportano acque di origine terrigena nel Mar Piccolo (es. emergenze di falda, citri, corsi d'acqua, impluvi, ecc.). L'obiettivo dell'indagine è stato quello di stabilire e valutare l'eventuale presenza di fonti ancora attive di contaminazione per microinquinanti organici (PCB, Diossine e PCB diossina-simili, IPA) e metalli ed elementi in tracce, legate all'afflusso delle acque da terra verso i bacini del Mar Piccolo, in particolare nel 1° Seno.

A tal fine e per individuare i punti in cui eseguire i campionamenti integrativi, si è proceduto a valutare sia i dati pregressi a disposizione, derivanti da altri campionamenti condotti con altre finalità da ARPA Puglia nel sito (monitoraggio dei corpi idrici superficiali ai sensi del D.M. 56/2009; verifica degli scarichi nell'ambito delle attività di controllo sugli stessi svolte dagli stessi da parte della Capitaneria di Porto e del DAP ARPA di Taranto; ecc.), sia i risultati messi in evidenza dall'esecuzione di attività previste nel medesimo Programma di Lavoro citato e condotte da altri Partner di progetto e di cui ARPA Puglia ha comunque curato il coordinamento.

In particolare, per quest'ultimo aspetto, sono stati esaminati i seguenti dati/informazioni:

- la mappatura delle anomalie termiche eseguita mediante sensoristica (termica e multispettrale), allo scopo di individuare l'ubicazione di eventuali *singolarità* termiche (positive o negative);
- gli apporti terrigeni connessi alla presenza della rete idrografica superficiale (con elevate caratteristiche di intermittenza);
- gli esiti dei rilievi geofisici e geomorfologici (*Multi Beam*, *Sub Bottom Profiler* e *Side Scan Sonar*).

Il piano ha, pertanto, previsto il campionamento di n. 26 stazioni localizzate nel 1° Seno (Figura 70 e Tabella 9). Per l'attuazione di questo piano di campionamento si ringrazia l'Ufficio Tecnico per l'Antinquinamento – Provveditorato Interregionale alle Opere Pubbliche Veneto-Trentino Alto Adige-Friuli Venezia Giulia del Magistrato alle Acque di Venezia ed il personale della società Thetis SpA per la disponibilità ed il prezioso contributo tecnico ed operativo offerto per l'utilizzo del Campionatore per Acque ad Alto Volume (CAV), ed il Reparto Operativo Aeronavale della Guardia di Finanza (di Bari e della sede di Taranto) per il supporto logistico ed i mezzi navali messi a disposizione.



Figura 70

Codice della stazione	Elemento esaminato	Anomalia termica riscontrata	Coordinate in WGS84					
			Est UTM 33	Nord UTM 33	Latitudine Nord	Longitudine Est	Nord	Est
1	citro	fredda	690338	4483340	40°28' 44,215" N	17°14' 43,838" E	40,478949	17,245511
2	citro	fredda	691403	4483342	40°28' 43,399" N	17°15' 29,039" E	40,478722	17,258066
3	apporto terrigeno (da verificare)	fredda	691161	4482782	40°28' 25,452" N	17°15' 18,161" E	40,473737	17,255045
4	apporto terrigeno (da verificare)	fredda	691810	4482844	40°28' 26,922" N	17°15' 45,770" E	40,474145	17,262714
5	apporto terrigeno (da verificare)	fredda	692273	4482961	40°28' 30,329" N	17°16' 5,545" E	40,475091	17,268207
6	apporto terrigeno	calda	692273	4483675	40°28' 53,467" N	17°16' 6,325" E	40,481519	17,268423
7	apporto terrigeno	fredda	692166	4483925	40°29' 1,658" N	17°16' 2,056" E	40,483794	17,267238
8	apporto terrigeno	calda	692095	4484280	40°29' 13,222" N	17°15' 59,430" E	40,487006	17,266508
9	citro (da verificare)	fredda	691730	4484363	40°29' 16,215" N	17°15' 44,028" E	40,487838	17,262230
10	apporto terrigeno	calda	691972	4484680	40°29' 26,287" N	17°15' 54,645" E	40,490635	17,265179
11	apporto terrigeno (da verificare)	freddo	691969	4484985	40°29' 36,174" N	17°15' 54,850" E	40,493382	17,265236
12	citro (da verificare)	fredda	691447	4484947	40°29' 35,376" N	17°15' 32,651" E	40,493160	17,259070
13	apporto terrigeno	fredda	692147	4485467	40°29' 51,646" N	17°16' 2,932" E	40,497679	17,267481
14	citro	fredda	692052	4485476	40°29' 52,017" N	17°15' 58,909" E	40,497782	17,266364
15	apporto terrigeno	calda	691881	4485589	40°29' 55,821" N	17°15' 51,773" E	40,498839	17,264381
16	apporto terrigeno	calda	691740	4485755	40°30' 1,318" N	17°15' 45,968" E	40,500366	17,262769
17	citro	fredda	691176	4485246	40°29' 45,291" N	17°15' 21,472" E	40,495914	17,255964
18	apporto terrigeno	calda	690981	4485757	40°30' 2,013" N	17°15' 13,749" E	40,500559	17,253819
19	citro	fredda	690689	4485382	40°29' 50,102" N	17°15' 0,946" E	40,497250	17,250263
20	apporto terrigeno	calda	690273	4485454	40°29' 52,779" N	17°14' 43,364" E	40,497994	17,245379
21	apporto terrigeno	fredda	690162	4485327	40°29' 48,754" N	17°14' 38,515" E	40,496876	17,244032
22	apporto terrigeno	calda	689622	4484873	40°29' 34,486" N	17°14' 15,102" E	40,492913	17,237528
23	apporto terrigeno	fredda	689454	4484676	40°29' 28,240" N	17°14' 7,758" E	40,491178	17,235488
24	citro	fredda	689842	4484333	40°29' 16,805" N	17°14' 23,858" E	40,488001	17,239961
25	apporto terrigeno	fredda	689060	4484120	40°29' 10,544" N	17°13' 50,437" E	40,486262	17,230677
26	apporto terrigeno	calda	689024	4483870	40°29' 2,472" N	17°13' 48,641" E	40,484020	17,230178

Tabella 9

Una delle difficoltà emerse durante la programmazione delle attività è stata quella di poter rilevare in maniera adeguata la presenza dei microinquinanti organici che, essendo presenti a livello di ultratracce, avrebbero richiesto una preconcentrazione dei campioni a partire da volumi elevate di acqua creando non pochi problemi di ordine logistici, operativi e analitici. A tal fine, a seguito di colloqui intercorsi tra la Direzione Scientifica di ARPA Puglia e l'Ufficio Tecnico per l'Antinquinamento (UTA) del Magistrato alle Acque di Venezia, è stato concordato l'impiego specifico di una serie di sistemi di campionamento ad alto volume (CAV), regolarmente in uso presso la Struttura veneta per il monitoraggio dei microinquinanti organici in Laguna di Venezia (Figura 71). Il sistema di campionamento ad immersione ed automatizzato, che prevede la preconcentrazione di grandi volumi d'acqua direttamente *in situ*, permette di poter raggiungere bassi limiti di rilevabilità incrementando di 20-30 volte il volume di campione rispetto ai metodi tradizionali, senza però dover trasportare e successivamente estrarre grandissimi volumi di acqua in laboratorio.



Figura 71. Dettaglio Campionatore ad Alto Volume. La pompa è controllata da un microprocessore, un misuratore di flusso, un sistema di filtrazione, una colonna di estrazione e degli accumulatori che forniscono l'energia di campionamento.

Pertanto, la fase operativa di campionamento ha previsto, per tutte le stazioni individuate l'esecuzione di:

- un rilievo, mediante sonda multiparametrica CTD, delle principali grandezze chimico-fisiche di base della colonna d'acqua (profondità, temperatura, pH, potenziale redox, torbidità, conducibilità, salinità, ossigeno disciolto e clorofilla a);
- un recupero, mediante bottiglia Niskin di opportune dimensioni, di campioni d'acqua da destinare alla determinazione delle concentrazioni di metalli ed elementi in tracce;
- la determinazione delle concentrazioni dei principali microinquinanti organici (PCB, Diossine e PCB diossina-simili, IPA) attraverso l'utilizzo di appositi Campionatori ad Alto Volume (CAV).

Il supporto logistico in campo è stato assicurato dal Reparto Operativo Aeronavale della Guardia di Finanza (di Bari e della sede di Taranto) che ha messo a disposizione il personale ed i mezzi navali per gli spostamenti nel 1 seno.

Dal punto di vista analitico è stato eseguito, da parte dei Laboratori del Dipartimento Provinciale di Taranto di ARPA Puglia, il seguente set di analisi ed indicatori:

- metalli ed elementi in tracce: Arsenico, Cadmio, Cromo totale, Mercurio, Nichel, Piombo, Rame, Zinco;
- diossine e PCB dioxin-like: 2378-TCDF, 2378-TCDD, 12378-PeCDF, 23478-PeCDF, 12378-PeCDD, 123478-HxCDF, 123678-HxCDF, 234678-HxCDF, 123789-HxCDF, 123478-HxCDD, 123678-HxCDD, 123789-HxCDD, 1234678-HpCDF, 1234789-HpCDF, 1234678-HpCDD, OCDF, OCDD, TOTALE TEQ PCDD/F, TOTALE TEQ PCDD/F + DL-PCB;
- PCB: PCB 4, PCB 3, PCB 28, PCB 77, PCB 81, PCB 52, PCB 110, PCB 101, PCB 99, PCB 126, PCB 105, PCB 114, PCB 118, PCB 123, PCB 95, PCB 151, PCB 149, PCB 146, PCB 138, PCB 169, PCB 157, PCB 156, PCB 167, PCB 153, PCB 187, PCB 183, PCB 180, PCB 177, PCB 170, PCB 189, PCB 206, PCB 205, PCB 209, Totale mono-decaCB, PCB indicatori (Somma PCB 28, 52, 101, 138, 153, 180), SOMMA PCB

28,52,77,81,95,99,101,105,110,114,118,123,126,138,146,149,151,153,156,157,167,169,170,177,180,183,187,189; TOTALE TEQ PCB.

Durante le attività di campo, realizzate tra il 13 ed il 17 gennaio 2014, è stato possibile eseguire i rilievi con sonda CTD ed il prelievo di campioni d'acqua in tutte le stazioni previste mentre, a causa di problemi tecnici e logistici non preventivabili, non è stato possibile eseguire l'acquisizione mediante CAV in 3 (21, 23 e 25) delle 26 stazioni del piano. Data comunque la vicinanza delle stazioni non eseguite con altre stazioni campionate regolarmente e la disponibilità di altri dati analitici derivanti da precedenti campionamenti, si è ritenuto comunque non necessario dover ripetere il campionamento con CAV in tali stazioni.

Determinazioni analitiche

Parametri chimico-fisici registrati *in situ*

La registrazione mediante sonda multiparametrica dei principali parametri chimico-fisici lungo la colonna d'acqua, effettuata nelle n. 26 stazioni previste dal piano ha permesso la raccolta di un corposo data set relativo all'intero corpo idrico indagato (profili verticali). L'analisi dei suddetti dati ha evidenziato alcune caratteristiche idrologiche abbastanza tipiche dei bacini semichiusi (ambienti di transizione), caratterizzati da acque di mare a lento riciclo e influenzate da apporti di acque dolci provenienti da sorgenti superficiali e subalvee. Di seguito sono brevemente commentati alcuni dei principali parametri misurati:

- Temperatura. Le acque del bacino indagato hanno evidenziato valori lungo l'intera colonna d'acqua in media compresi fra i 14-15 °C, valore questo abbastanza nella norma visto il periodo stagionale d'indagine (inverno); in alcune stazioni (staz. 4 e 5) localizzate sul versante sud-orientale del bacino sono state rilevate temperature lievemente più basse (intorno ai 13 °C) ma solo per gli strati idrici più superficiali (sino a 2-3 m di profondità).
- Ossigeno disciolto e % di saturazione. Il tenore di ossigeno disciolto e la relativa percentuale di saturazione sono apparsi sempre elevati in tutte le stazioni di misura e lungo la colonna d'acqua, con valori generalmente compresi fra 8-9 mg/l corrispondenti a tenori di saturazione in media sempre superiori al 100%. I tenori di sovrassaturazione dell'ossigeno disciolto appaiono quasi sempre più elevati in tipica correlazione con le concentrazioni di clorofilla, riscontrate ad esempio nelle stazioni 1, 2, 4, 5, 6, 7 e 24, e riferite probabilmente ad una più elevata produzione fitoplanctonica localizzata in quelle aree.
- pH. I valori di pH misurati sono risultati in media ovunque abbastanza normali, con valori compresi fra 7,4-7,8 per gli strati idrici intermedi e superficiali e valori intorno a 8,0, quindi più simili all'acqua di mare, per gli strati idrici posti in prossimità del fondo.
- Salinità e Conducibilità elettrica. Anche i valori di salinità e conducibilità elettrica misurati su tutta la colonna d'acqua hanno evidenziato una certa stratificazione dei valori, del tutto normale per gli ambienti di transizione come quello in esame. In particolare, soprattutto in superficie, si sono evidenziati i valori di salinità relativamente più bassi e compresi nel range 30,0 - 34,0 psu, pari a valori di conducibilità compresi fra 37,2 - 41,5 mS/cm, specie in corrispondenza di stazioni (es. 19, 18, 17, 8, 9, 10) sottoposte all'influenza degli apporti di acque dolci (citri, canali superficiali), mentre in zone non influenzate dagli apporti di acque dolci il valore si è aggirato intorno ai 35-36 psu pari a 42,5 - 44,2 mS/cm. Negli strati posti più in profondità la salinità ha raggiunto normalmente i 37,8 psu (46,0 mS/cm).
- Clorofilla. I valori di clorofilla misurati in questo periodo invernale nel bacino del Mar Piccolo sono risultati mediamente compresi fra 0,3 - 0,9 µg/l. Occasionalmente sono stati registrati valori sensibilmente più elevati e compresi fra 1,0 e 4,3 µg/l, in particolare per le stazioni poste nel quadrante sud-orientale del bacino (staz. 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8) ed alcune del settore nord-occidentale (staz. 23, 24).
- Torbidità. Le misure relative al parametro torbidità hanno evidenziato valori in media attestati intorno a 2-3 NFU, occasionalmente con valori di picco anche sino a 14 NFU solo per lo strato idrico più a contatto con il fondale di prevalente origine fangosa.

Parametri chimici di laboratorio

Per quanto riguarda le concentrazioni analitiche rilevate per i vari parametri ricercati queste sono state confrontate con i limiti riportati nel D.M. n. 56/2009 Tabella 1/A e 1/B, che riportano, rispettivamente, gli standard di qualità nella colonna d'acqua per le sostanze dell'elenco di priorità e per quelle non appartenenti all'elenco delle prioritarie.

Per quanto riguarda il Cadmio, a fronte di un valore limite di 0.2 µg/l riportato in Tabella 1/A, le stazioni n. 3 e n. 13 hanno rilevato una concentrazione pari a 0.4 µg/l, mentre le stazioni n. 8, n. 20 e n. 23 una concentrazione di poco superiore pari a 0.3 µg/l. Il Cromo totale non evidenzia superamenti del limite di 4 µg/l riportato in Tabella 1/B, mentre il Piombo, nella stazione n. 13 mostra un valore di concentrazione pari a 7.3 µg/l di poco superiore al valore 7.2 µg/l riportato in Tabella 1/B.

Per quanto i microinquinanti organici la situazione appare la seguente:

- la sommatoria dei PCB (Figura 74-B) evidenzia due massimi di concentrazione rispettivamente nella stazione n. 22 in prossimità delle Idrovore dell'ILVA (circa 4.652 pg/l) e nella stazione n. 13, in prossimità dello sbocco del canale Citrello (circa 2.251 pg/l) e, complessivamente, una situazione di maggiore presenza nella zona a nord del 1° seno, tra il fiume Galeso (1.024 pg/l) ed in prossimità del citro Galeso (1.080 pg/l) e gli ex Cantieri Tosi (1.103 pg/l);
- la sommatoria delle diossine (PCDD/F) e dei PCB diossina-simili (DL-PCB), in Figura 74-A, espressa in equivalenti di tossicità (TEQ), rileva un'area maggiormente impattata a ovest del 1° seno dove si riscontrano le concentrazioni massime nella stazione n. 22 (0.7068 pg WHO-TE/L), in prossimità delle Idrovore dell'ILVA, e nella stazione n. 24 (0.5354 pg WHO-TE/L), un presunto citro, e valori comunque importanti nella stazione 19 (0.259 pg WHO-TE/L) e 20 (0.4285 pg WHO-TE/L) in prossimità del citro Galeso.
- gli IPA (Figura 73-A), espressi come sommatoria complessiva, mostrano concentrazioni massime nella stazione n. 22 (circa 0.5 µg/l), in prossimità delle Idrovore dell'ILVA, nella stazione n. 13 (circa 0.15 µg/l), in prossimità del canale Citrello, e nella stazione n. 11 (0.1 µg/l), ad ovest del 1° seno;
- il Benzo(a)pirene (Figura 73-B), il cui limite indicato dalla Tabella 1/A del D.M. 56/2009 è di 0.05 µg/l, ha un valore di poco inferiore nella stazione n. 22 (0.034 µg/l);
- la sommatoria dell'Indeno(1,2,3,C-D)pirene con il Benzo(g,h,i)perilene, in Figura 73-D, normata in Tabella 1/A con un limite pari a 0.002 µg/l, presenta concentrazioni critiche nella stazione n. 22 (circa 0.05 µg/l), in prossimità delle Idrovore dell'ILVA, e nella stazione n. 5 (0.003 µg/l), nella zona sud del 1° seno, a ridosso del Ponte Punta Penna Pizzone;
- la sommatoria del Benzo(k)fluorantene con il Benzo(b+j)fluorantene, in Figura 73-C, restituita dai laboratori ARPA, pur non avendo un riscontro per i limiti normativi, può essere associata per affinità chimica alla sommatoria del Benzo(k)fluorantene con il Benzo(b+j)fluorantene, il cui limite riportato in Tabella 1/A del D.M. 56/2009 è di 0.003 µg/l, evidenziando una notevole concentrazione nella stazione n. 22 (0.05 µg/l) ed un valore di poco inferiore al limite predetto nella stazione n. 5 (0.002 µg/l), nella zona sud del 1° seno, a ridosso del Ponte Punta Penna Pizzone.

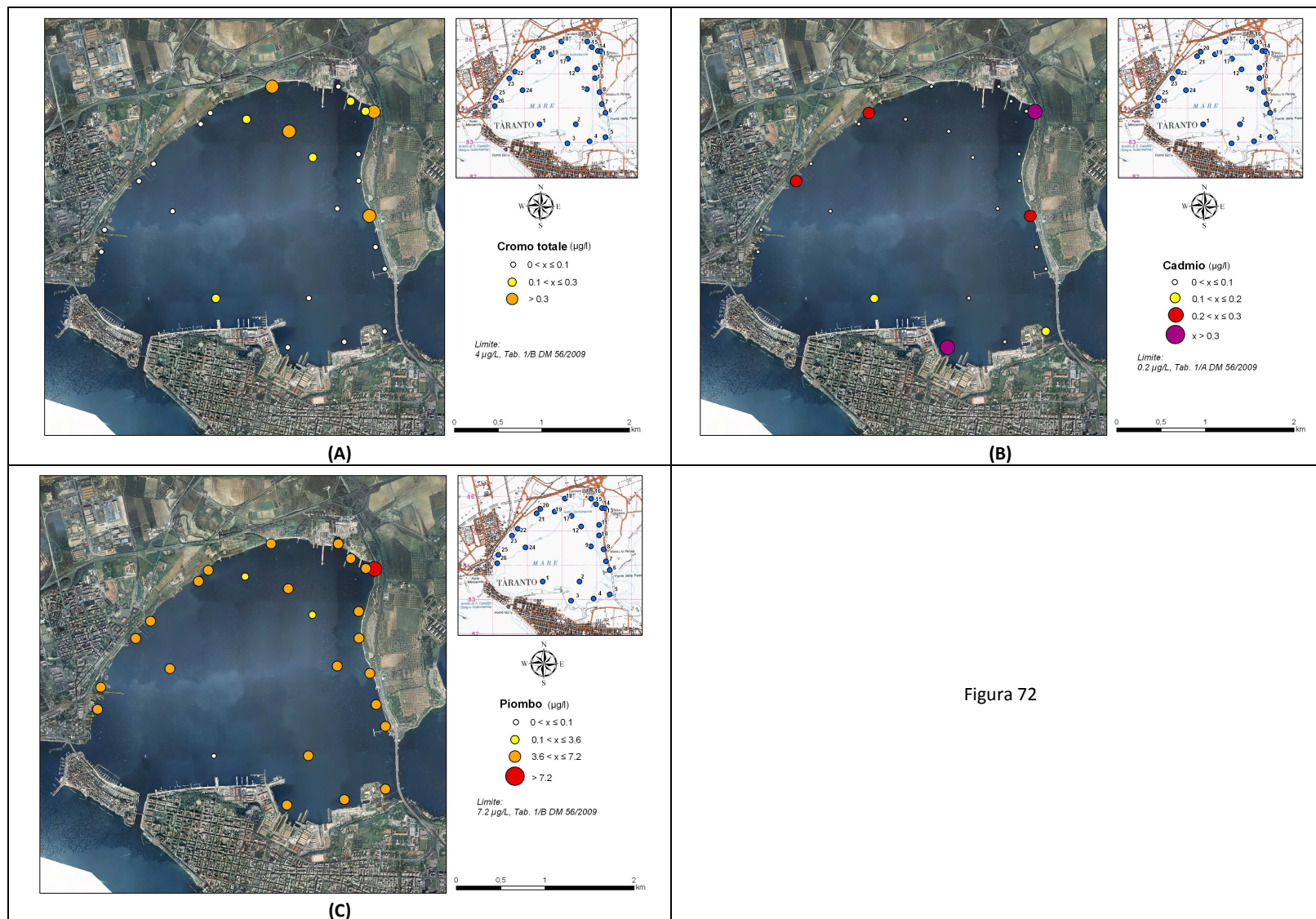


Figura 72

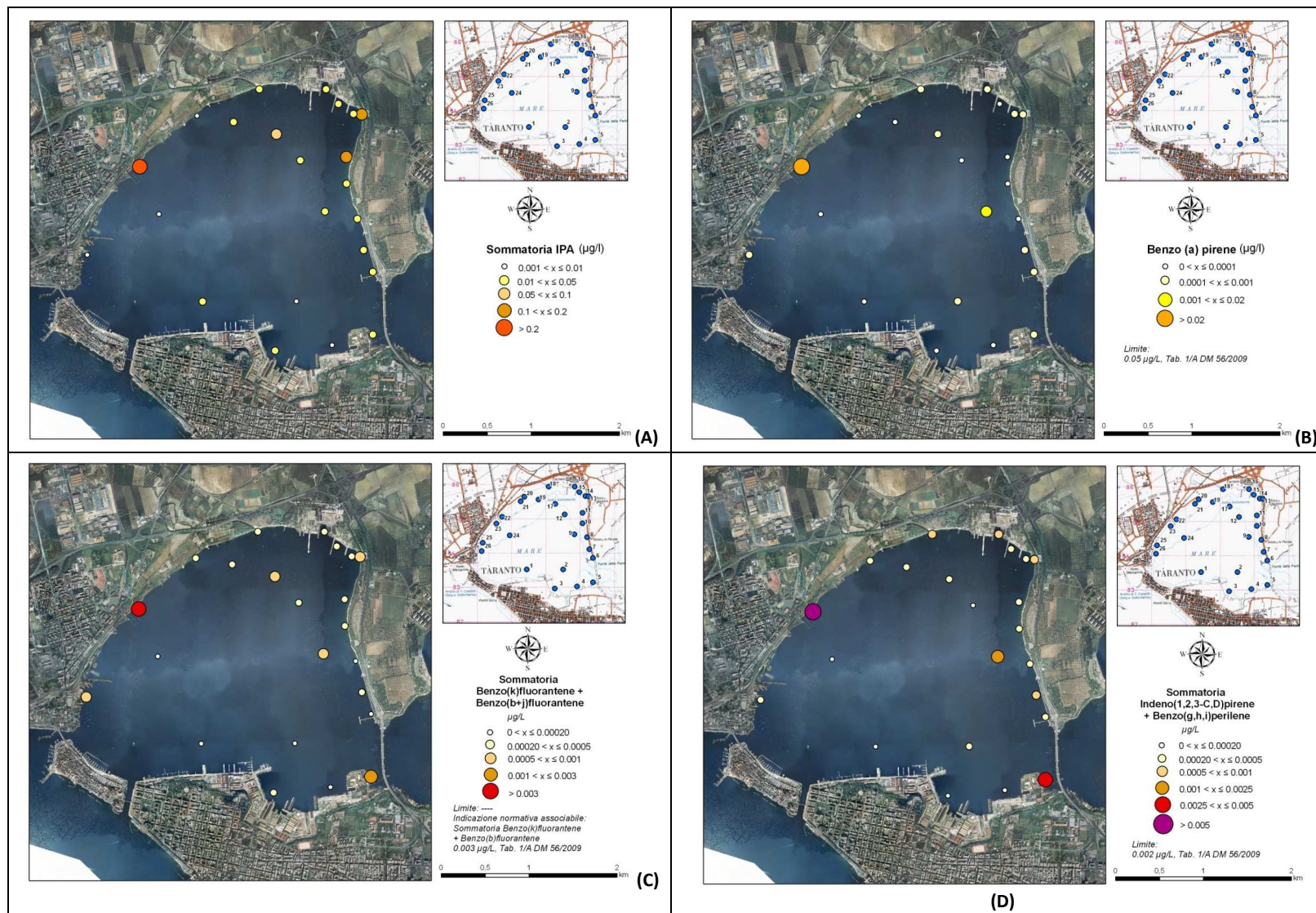


Figura 73

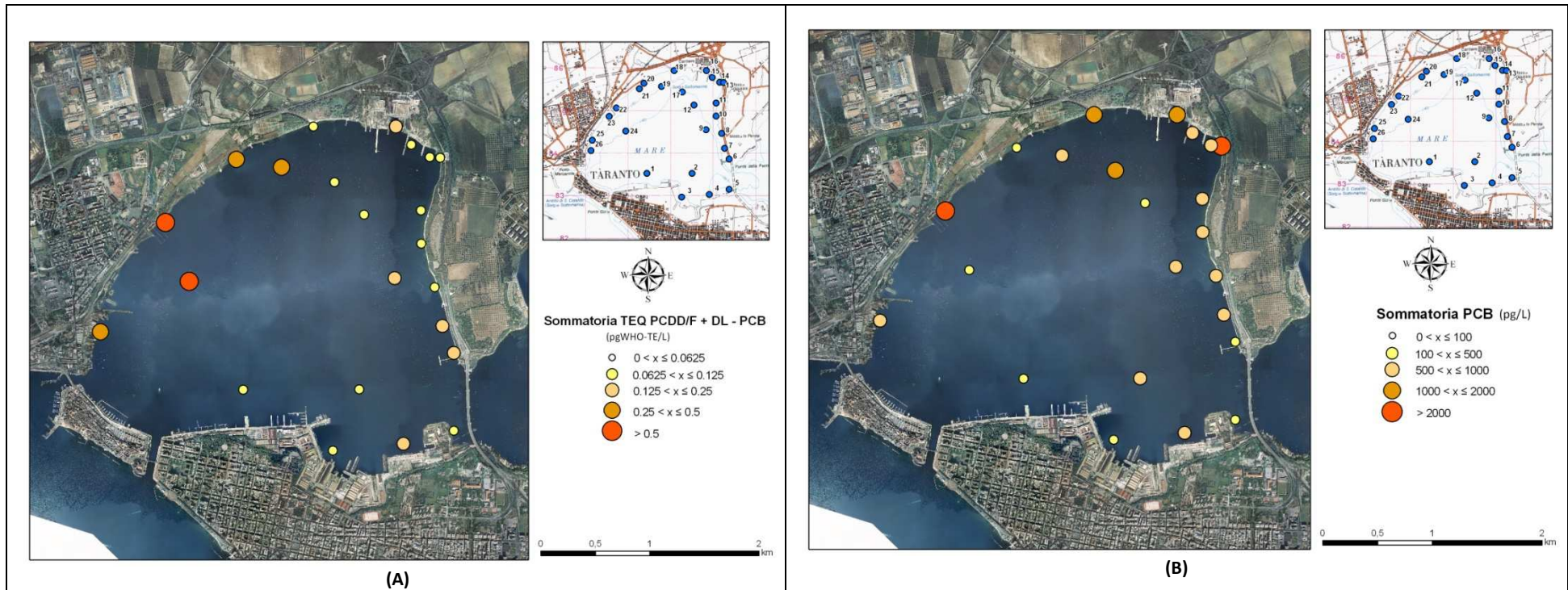


Figura 74

Considerazioni sui risultati analitici ottenuti e scenari di valutazione degli apporti

I parametri chimico-fisici rilevati *in situ* (colonna d'acqua) confermano le caratteristiche di bacino di "transizione" attribuite al Mar Piccolo, non evidenziando tuttavia significative differenze tra le varie zone investigate.

Per quanto invece attiene le concentrazioni misurate per gli inquinanti (metalli pesanti e microinquinanti organici), è possibile speculare sulla distribuzione spaziale di alcuni di essi, sebbene si debba ribadire che la disponibilità dei dati si riferisce ad un'unica campagna di campionamento. I risultati analitici ottenuti sono riportati in Allegato 6.

In sintesi, tra i metalli le cui concentrazioni hanno superato gli Standard di Qualità Ambientale previsti dalle Tabelle 1A e 1B del D.M. 56/2009, il Cadmio presenta i valori più alti nelle zone soggette ad apporti idrici superficiali in prossimità di insediamenti industriali (ex Cantieri Tosi-Foce Citrello, Arsenale, zona industriale di Taranto), così come il Piombo (nello specifico nella zona ex Cantieri Tosi-Foce Citrello).

Tra i microinquinanti organici indagati, alcuni hanno superato gli Standard di Qualità Ambientale previsti dalla Tabella 1A del D.M. 56/2009, ed in particolare gli indicatori della contaminazione da IPA; anche in questo caso i valori più alti sono stati riscontrati in zone soggette ad apporti idrici superficiali in prossimità di insediamenti industriali (zona industriale di Taranto e Arsenale).

Le concentrazioni di PCB (sommatoria), pur non essendo disponibile nella normativa italiana un valore limite per la matrice "acque", hanno invece evidenziato una distribuzione che può essere messa in relazione a differenti apporti terrigeni (non solo quelli in prossimità di insediamenti industriali), con contributi che sembrano legati sia alla conformazione del principale bacino idrografico sotteso al Mar Piccolo (vedi Allegato 2), e ai conseguenti processi di dilavamento e trasporto superficiale da monte verso valle, sia alla presenza e ai percorsi della falda acquifera, con particolare riferimento ai "citri" (vedi relazione Allegato 4).

Proprio sulla base di questa ultima evidenza, e anche tenendo conto della problematica ambientale e socio-economica causata dalle concentrazioni dei PCB nei mitili allevati nel Mar Piccolo, rilevate oltre i limiti previsti dai Regolamenti CE 1881/2006 e 1259/2011 (vedasi l'Ordinanza per l'inibizione del I Seno alla produzione commerciale), si è ritenuto opportuno approfondire l'argomento, tentando di stimare in via preliminare, con i dati a disposizione e con tutte le limitazioni del caso, l'apporto quantitativo di questa categoria di microinquinanti organici nel bacino in esame.

I dati utilizzati per il calcolo sono quelli relativi alle portate idriche in ingresso al Mar Piccolo I Seno, reperibili nei report tematici di cui alla presente Relazione ed integrate con quelle indicate nel Rapporto CESI-DAM Diagnostica Ambientale (2005), e alle concentrazioni dei PCB (sommatoria) nelle acque così come rilevate da questo studio ARPA. In particolare, considerando la portata media giornaliera di tutti gli apporti terrigeni (acque superficiali e sotterranee), stimata in 560000 m³/giorno, e la concentrazione media per i PCB nelle acque in prossimità degli stessi apporti, pari a 902,28 picogrammi/l, con le dovute trasformazioni ne deriverebbe un quantitativo di Policlorobifenili immesso annualmente nel I Seno del Mar Piccolo pari a 184,42 g.

Se, per ipotesi, tale quantitativo annuo fosse trasferito in maniera diretta ai sedimenti (considerata anche la densità dei PCB, maggiore di quella dell'acqua), e se lo stesso si distribuisse in maniera omogenea su tutta l'estensione dei fondali del bacino (la superficie del I Seno è stimata in circa 8.300.000 m²), contaminerebbe uno strato di sedimento a prevalente granulometria fine (argilla), per lo spessore di un millimetro (misura del tasso di sedimentazione medio annuale nel I Seno, così come riportato nell'Allegato 3), con una concentrazione di 11,13 microgrammi/kg; con questi apporti dunque, e con il tasso di sedimentazione attuale, le concentrazioni medie di PCB nei primi 50 cm di fondale supererebbero i valori di intervento previsti da ISPRA per le bonifiche (190 microgrammi/kg) solo dopo qualche migliaio di anni.

Se si utilizzasse, al posto della concentrazione media, il valore massimo rilevato da ARPA Puglia nei campioni di acqua analizzati, pari a 4651,96 picogrammi/l, con le stesse ipotesi di partenza si arriverebbe ad un quantitativo annuale di 950,86 g di PCB immessi nel I Seno del Mar Piccolo, con concentrazioni nel primo

millimetro di sedimento stimate in 57,39 microgrammi/kg. In questo caso sarebbe necessario più di un millennio per raggiungere o superare i valori di intervento ISPRA nei primi 50 cm di sedimento.

Lo scenario cambia parzialmente se si ipotizza che, a causa dell'idrologia del bacino, la contaminazione da apporti localizzati si concentri in particolari zone di fondale. L'esempio trattato di seguito si riferisce all'eventuale influenza, in termini di apporto di microinquinanti, che possano avere i corsi d'acqua superficiali e i "citri" della zona a nord del I Seno, su una porzione di fondale per la quale ISPRA, nel documento sulla valutazione dei dati di caratterizzazione (2010), aveva rilevato una concentrazione di PCB superiore ai limiti di intervento nei primi 50 cm di sedimento superficiale (Figura 75).

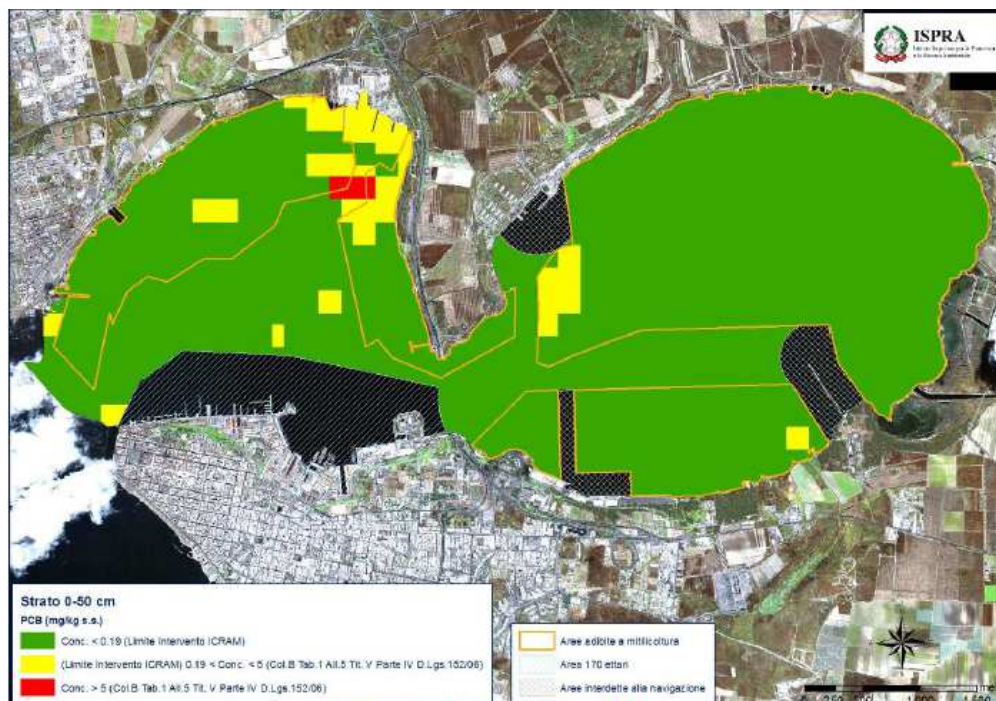


Figura 75. Elaborazione geostatistica delle concentrazioni di PCB per lo strato superficiale 0-50 cm (Relazione ISPRA, 2010).

Per questa analisi si sono utilizzati i dati di portata del fiume Galeso e del canale Citrello, e degli omologhi citri "Galeso" e "Citrello" (142500 m³/giorno in totale, il 25% circa degli apporti complessivi nel I Seno del Mar Piccolo), oltre che i dati di concentrazione dei PCB rilevati da ARPA Puglia in prossimità dei singoli citati apporti. Elaborando le informazioni, risulterebbe una stima delle quantità medie di inquinanti, pesate in base alle portate relative e immesse annualmente nel I Seno da queste fonti, pari a 52,92 g di PCB.

Con le stesse ipotesi riportate in precedenza (trasferimento dei PCB dall'acqua ai fondali in maniera diretta, sedimento a prevalente granulometria fine), considerata l'area fortemente impattata quella "gialla e rossa" a nord-est del bacino del I Seno (vedi figura precedente) stimata in circa 800000 m², tale quantità di inquinante contaminerebbe uno strato di sedimento di 1 mm di spessore con una concentrazione di 33,08 microgrammi/kg ogni anno; in queste condizioni e in accordo ai ratei sedimentari le concentrazioni medie di PCB nei primi 50 cm di fondale supererebbero i valori di intervento previsti da ISPRA dopo diversi secoli.

In maniera del tutto cautelativa, presupponendo che l'intero quantitativo immesso annualmente nel I Seno del Mar Piccolo (stimato mediamente in 184,42 g) sia distribuito solo nell'area "gialla e rossa", le concentrazioni nel primo millimetro di materiale sedimentato sarebbero pari a 115,27 microgrammi/kg, ed anche in questo caso sarebbero necessarie diverse centinaia di anni per eguagliare o superare i valori di intervento ISPRA nei primi 50 cm di fondale.

Nel caso estremo valutabile con i dati a disposizione, ovvero se fosse immesso nell'intero bacino il quantitativo stimato come "massimo" attuale (950,86 g di PCB), e questo si distribuisse solo nell'area "gialla e rossa", le concentrazioni nel millimetro di materiale sedimentato in un anno sarebbero pari a 594,29

microgrammi/kg, con un superamento dei valori di intervento ISPRA per i primi 50 cm di fondale dopo 150 anni circa.

Le stime sopra riportate, come già premesso preliminari e condizionate dagli assunti di partenza, porterebbero alla conclusione che le attuali immissioni di PCB nel I Seno del Mar Piccolo derivanti dai corsi d'acqua superficiali e dai citri, seppure confermate e da interrompere e/o minimizzare, non giustificano le elevate concentrazioni di inquinanti misurate nei sedimenti nell'ambito delle caratterizzazioni e altri studi. Dato l'attuale quantitativo dei microinquinanti organici trasferito per via delle acque di origine terrigena, si può dunque ipotizzare un accumulo pregresso nei sedimenti probabilmente dovuto a immissioni di più intensa magnitudine avvenute in tempi passati, attraverso gli stessi vettori (corsi d'acqua superficiali, citri, impluvi, canalizzazioni, ecc.) o con sversamenti diretti nel bacino.

Sulla base delle considerazioni sin qui esposte, si può dunque supporre, per il I Seno del Mar Piccolo, un ruolo non trascurabile, attivo, e probabilmente predominante, dei sedimenti quale fonte secondaria di contaminazione verso la componente biologica (a causa delle dinamiche di risospensione), in particolare a carico degli organismi filtratori (in questo caso i mitili, vedi relazione Allegato 7).

Analogamente le stime, seppure preliminari e basate su un limitato data-set, dei carichi di contaminanti veicolati dalle componenti terrigene delle acque (qui intese come fonti primarie), non escludono che tale cronico apporto possa contribuire, per effetto sinergico con le fonti secondarie, ad un complessivo deterioramento della qualità (nei termini di inquinamento da sostanze chimiche di origine antropica) del sistema ambientale.

3.1.3. Ulteriori valutazione sulla presenza di metalli e PCB nelle acque (a cura del CNR IAMC di Taranto)

Per quanto riguarda una stima degli apporti di sostanze contaminanti in Mar Piccolo, quali metalli e microinquinanti organici, il gruppo di lavoro del CNR IAMC di Taranto, nell'ambito delle attività previste dalla Convenzione siglata a luglio 2013 con ARPA Puglia, ha realizzato uno studio inerente la *"Stima dei flussi di PCB in ingresso nel Mar Piccolo anche attraverso la mappatura e l'analisi di acque delle sorgenti sottomarine (Citri) e degli apporti fluviali"*, nel quale sono stati eseguiti una serie di campionamenti in corrispondenza dei principali citri (novembre 2013) censiti nell'area (Figura 76), ed in prossimità delle sorgenti poste a terra (gennaio 2014), campionando sia acque sia sedimenti (Figura 77). In particolare: Citro Galeso (prof. 20 m, portata 750 l/s) e Citro Citrello (prof. 15 m, portata 350 l/s) nel 1° seno e Citro Le Copre (prof. 32 m, portata 650 l/s) nel 2° seno; fiume Galeso e canale Citrello per il 1° seno, sorgente Battentieri e sorgente AIVAM nel 2° seno.

Per quanto riguarda le sorgenti sottomarine i risultati sono stati confrontati anche con gli esiti analitici di un campionamento realizzato in corrispondenza di una stazione (cfr. "Stazione 2") posta in un'area fortemente impattata in prossimità dell'Arsenale della Marina Militare, scelta per la valutazione del biaccumulo nei mitili (vedi Allegato 8).



Figura 76



Figura 77

Per quanto riguarda le analisi condotte sui campioni d'acqua, finalizzati all'individuazione di sorgenti "primarie" di contaminazione, sono state eseguite le determinazioni per metalli pesanti (Cadmio, Rame, Nichel, Piombo, Mercurio, Manganese, Ferro e Zinco) e PCB e, nelle medesime stazioni, sono stati acquisiti anche i parametri chimico-fisici (temperatura, pH, salinità, ossigeno disciolto) per mezzo di una sonda multiparametrica.

Sorgenti sottomarine (Citri)

I livelli di concentrazione dei metalli riscontrati ai tre citri sono inferiori rispetto a quelli presenti nelle acque della "stazione 2". I livelli di concentrazione più elevati si riscontrano, comunque, nelle acque del citro Citrello per quanto riguarda il Rame e il Piombo.

	Cd	Cu	Ni	Pb	Hg	Mn	Fe	Zn
	µg/l							
Citro Galeso	0.007	0.753	0.293	0.041	0.011	0.031	9.515	3.740
Citro Citrello	0.011	1.042	0.242	0.156	0.009	0.027	10.616	0.772
Citro Lecopre	0.008	0.701	0.036	0.131	0.005	0.016	8.390	0.483
Staz. 2 Mar Piccolo	0.043	1.958	0.831	0.248	nd	1.970	39.39	6.73

Tabella 10

Per quanto riguarda i PCB, la sommatoria dei 28 congeneri restituisce valori maggiori per le acque campionate in corrispondenza del citro Citrello (1.84 ng/l) rispetto a quelli delle altre stazioni di prelievo. La maggior parte dei congeneri sono risultati non determinabili. Il PCB 153 (6Cl) è risultato l'unico congenere presente in tutte le stazioni mentre il PCB 138 (6Cl) è stato determinato solo in corrispondenza del citro Citrello (I Seno) e della "stazione 2".

PCB (ng/l)	Citro Galeso	Citro Citrello	Citro Le Copre	Staz. 2 Mar Piccolo
18	ND	0.18	0.00	ND
31	ND	0.06	0.00	0.06
28	ND	0.08	0.04	0.07
52	ND	0.03	0.03	0.16
44	ND	0.04	0.00	0.05
95	0.03	0.09	0.00	0.10
101	ND	0.08	0.00	0.16
99	ND	0.04	0.00	0.03
110	0.03	0.09	0.03	0.05
151	ND	ND	0.00	ND
123	ND	ND	0.00	ND
149	ND	0.06	0.00	0.07
118	0.08	0.09	0.03	0.08
114	ND	ND	0.00	ND
146	ND	0.11	0.00	ND
153	0.06	0.13	0.08	0.11
105	ND	ND	0.00	ND
138	ND	0.06	0.00	0.08
187	ND	ND	0.00	ND
183	ND	ND	0.00	ND
128	ND	ND	0.00	ND
167	ND	ND	0.00	ND
177	ND	ND	0.00	ND
156	ND	ND	0.00	ND
157	ND	ND	0.00	ND
180	ND	0.03	0.00	0.06
170	ND	ND	0.00	ND
189	ND	ND	0.00	ND
PCB Σ28	0.20	1.84	0.21	1.08

Tabella 11

Sorgenti emerse e Canale Citrello

Anche in questo caso i valori determinati per i metalli non hanno fatto emergere situazioni critiche. Le concentrazioni di Cadmio e Mercurio sono risultate paragonabili e piuttosto basse (range 0.002-0.004 µg/l) e le concentrazioni di Rame, Nichel e Piombo hanno mostrato valori compresi tra 0.07-0.395 µg/l; 0.039-0.073 µg/l e 0.043-0.067 µg/l rispettivamente (Tabella 12).

	Cd	Cu	Ni µg/L	Pb	Hg
sorgente Galeso	0.003	0.218	0.043	0.055	0.002
canale Citrello	0.002	0.395	0.039	0.043	0.002
sorgente Battendieri	0.003	0.217	0.073	0.067	0.004
sorgente "AIVAM"	0.004	0.070	0.039	0.045	0.003

Tabella 12

In Tabella 13 sono, invece, riportati i risultati delle determinazioni dei PCB. E' possibile evidenziare che la sommatoria dei 28 congeneri è risultata notevolmente bassa, con valori compresi tra n.d. (sorgente Battendieri) e 0.36 ng/l in corrispondenza del canale Citrello, nel quale gli unici congeneri riscontrati sono stati il PCB 110 (0.2 ng/l), il PCB 153 (0.11 ng/l) e il PCB 138 (0.05 ng/l).

NOME IUPAC	PCB (ng/l)	Sorg. Galeso	Canale Citrello	Sorg. AIVAM	Sorg. Battendieri
2,2',5'-Trichlorobiphenyl	18	ND	ND	ND	ND
2,4',5'-Trichlorobiphenyl	31	ND	ND	ND	ND
2,4,4'-Trichlorobiphenyl	28	ND	ND	ND	ND
2,2',5,5'-Tetrachlorobiphenyl	52	ND	ND	ND	ND
2,2',3,5'-Tetrachlorobiphenyl	44	ND	ND	ND	ND
2,2',3,5',6-Pentachlorobiphenyl	95	ND	ND	ND	ND
2,2',4,5,5'-Pentachlorobiphenyl	101	ND	ND	ND	ND
2,2',4,4',5-Pentachlorobiphenyl	99	ND	ND	ND	ND
2,3,3',4',6-Pentachlorobiphenyl	110	ND	0.2	ND	ND
2,2',3,5,5',6-Hexachlorobiphenyl	151	ND	ND	ND	ND
2,3',4,4',5'-Pentachlorobiphenyl	123	ND	ND	ND	ND
2,2',3,4',5',6-Hexachlorobiphenyl	149	ND	ND	ND	ND
2,3',4,4',5-Pentachlorobiphenyl	118	ND	ND	ND	ND
2,3,4,4',5-Pentachlorobiphenyl	114	ND	ND	ND	ND
2,2',3,4',5,5'-Hexachlorobiphenyl	146	ND	ND	ND	ND
2,2',4,4',5,5'-Hexachlorobiphenyl	153	0.06	0.11	0.06	ND
2,3,3',4,4'-Pentachlorobiphenyl	105	ND	ND	ND	ND
2,2',3,4,4',5'-Hexachlorobiphenyl	138	ND	0.05	ND	ND
2,2',3,4',5,5',6-Heptachlorobiphenyl	187	ND	ND	ND	ND
2,2',3,4,4',5',6-Heptachlorobiphenyl	183	ND	ND	ND	ND
2,2',3,3',4,4'-Hexachlorobiphenyl	128	ND	ND	ND	ND
2,3',4,4',5,5'-Hexachlorobiphenyl	167	ND	ND	ND	ND
2,2',3,3',4,4',5'-Heptachlorobiphenyl	177	ND	ND	ND	ND
2,3,3',4,4',5-Hexachlorobiphenyl	156	ND	ND	ND	ND
2,3,3',4,4',5'-Hexachlorobiphenyl	157	ND	ND	ND	ND
2,2',3,4,4',5,5'-Heptachlorobiphenyl	180	ND	ND	ND	ND
2,2',3,3',4,4',5-Heptachlorobiphenyl	170	ND	ND	ND	ND
2,3,3',4,4',5,5'-Heptachlorobiphenyl	189	ND	ND	ND	ND
PCB Σ28		0.06	0.36	0.06	ND

Tabella 13

3.1.4. Attività di sopralluogo in alcune zone del 1° seno (a cura di ARPA Puglia con il supporto dei VVF di Taranto)

A completamento delle attività ed al fine di interpretare e valutare con maggiore cognizione i risultati emersi a seguito della realizzazione del campionamento integrativo delle acque nonché, per avere informazioni dirette sullo stato qualitativo in cui versano i fondali in alcune zone del 1° seno, ARPA Puglia grazie alla collaborazione tecnica-operativa ed al supporto logistico, nonché di personale, del Gruppo Sommozzatori dei Vigili del Fuoco di Taranto, ha potuto svolgere una serie di video ispezioni dei fondali in alcune zone corrispondenti alle stazioni del piano di campionamento delle acque. In particolare, l'attenzione è stata rivolta verso alcune aree in prossimità di citri ed in alcuni punti segnatamente caratterizzati da apporti terrigeni delle acque superficiali. In Figura 78 si riportano le stazioni investigate. Le

attività di campo hanno previsto, in alcune stazioni, il rilievo video realizzato calando in acqua, dalla pilotina di supporto dei VVF, una videocamera filoguidata e collegata ad un monitor posto sotto coperta, in altre il rilievo è stato eseguito direttamente dall'operatore subacqueo tramite videocamera e fotocamera subacquea (Figura 79).



Figura 78

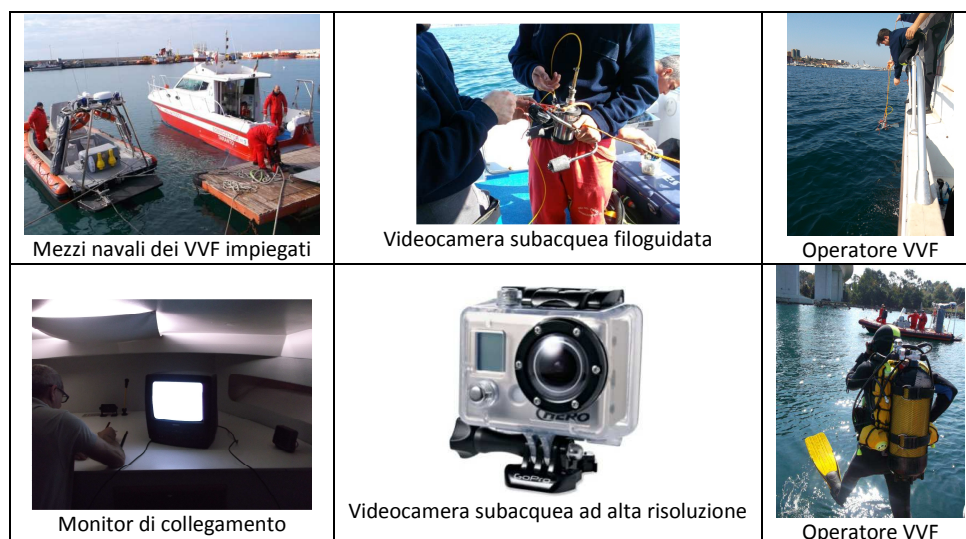


Figura 79

In Tabella 14 sono, invece, restituite le informazioni riepilogative dei punti ispezionati mentre, dalla Figura 80 e nella Figura 81 sono mostrate alcune immagini rappresentative delle condizioni dei fondali rilevate durante le videoriprese effettuate.

Località	TARANTO	Sito	Primo Seno Mar Piccolo	Data	12.03.2014
Stazione 1	Effettuate solo Riprese Subacquee con Telecamera Filoguidata da Imbarcazione				
Inizio Riprese ore	09,15	Coordinate	40° 28' 713 N 17° 14' 760 E	40° 28' 42",78 N 40° 14' 45",6 E	Profondità m 12
Termine Riprese ore	09,25	Coordinate	40° 28' 681 N 17° 14' 799 E	40° 28' 40",86 N 17° 14' 47",94 E	Profondità m 13
Venti	Moderati dai quadranti settentrionali		Riprese effettuate utilizzando lo scarroccio della imbarcazione		
Stazione 2	Effettuate solo Riprese Subacquee con Telecamera Filoguidata da Imbarcazione e telecamera senza filo				
Inizio Riprese ore	09,45	Coordinate	40° 28' 720 N 17° 15' 385 E	40° 28' 42",78 N 17° 15' 23",10 E	Profondità m 11
Termine Riprese ore	09,53	Coordinate	40° 28' 687 N 17° 15' 344 E	40° 28' 41",22 N 17° 15' 20",64 E	Profondità m 11
Venti	Moderati dai quadranti settentrionali		Riprese effettuate utilizzando lo scarroccio della imbarcazione		
Stazione 3	Effettuate solo Riprese Subacquee con Telecamera Filoguidata da Imbarcazione e telecamera senza filo				
Inizio Riprese ore	09,58	Coordinate	40° 28' 412 N 17° 15' 306 E	40° 28' 24",72 N 17° 15' 18",36 E	Profondità m 9,5
Termine Riprese ore	10,15	Coordinate	40° 28' 372 N 17° 15' 293 E	40° 28' 22",32 N 17° 15' 17",58 E	Profondità m 9,5
Venti	Moderati dai quadranti settentrionali		Riprese effettuate utilizzando lo scarroccio della imbarcazione		
Stazione 4	Effettuate solo Riprese Subacquee con Telecamere Filoguidate da Imbarcazione e telecamera senza filo				
Inizio Riprese ore	10,22	Coordinate	40° 28' 448 N 17° 15' 767 E	40° 28' 26",88 N 17° 15' 40",02 E	Profondità m 9
Termine Riprese ore	10,30	Coordinate	40° 28' 441 N 17° 15' 845 E	40° 28' 26",46 N 17° 15' 50",70 E	Profondità m 9
Venti	Moderati dai quadranti settentrionali		Riprese effettuate utilizzando lo scarroccio della imbarcazione		
Stazione 5	Effettuate Riprese e Foto con Telecamera senza filo e macchina fotografica				
Inizio Riprese ore	10,40	Coordinate	40° 28' 525 N 17° 16' 073 E	40° 28' 31",50 N 17° 15' 04",38 E	Profondità m 8,5 Temp. Acqua 14°
Termine Riprese ore	11,30	Venti	Moderati dai quadranti settentrionali		
Riprese effettuate con operatori subacquei per ispezionare pareti lungo il molo					
Stazione 9	Effettuate Riprese e Foto con Telecamera senza filo e macchina fotografica				
Inizio Riprese ore	11,40	Coordinate	40° 29' 425 N 17° 15' 668 E	40° 28' 25",50 N 17° 15' 40",08 E	Profondità m 10 Temp. Acqua 15°
Termine Riprese ore	12,30	Venti	Moderati dai quadranti settentrionali		
Riprese effettuate con operatori subacquei con il metodo di ricerca a chiocciola. Ispezionate due aree circolari aventi raggio di 10m ciascuna					
Stazione 12	Effettuate Riprese e Foto con Telecamera senza filo e macchina fotografica				
Inizio Riprese ore	13,05	Coordinate	40° 29' 779 N 17° 15' 551 E	40° 28' 46",74 N 17° 15' 33",06 E	Profondità m 8 Temp. Acqua 14°
Termine Riprese ore	13,25	Venti	Moderati dai quadranti settentrionali		
Riprese effettuate con operatori subacquei con il metodo di ricerca a chiocciola. Ispezionate due aree circolari aventi raggio di 10m ciascuna					
Stazione 24	Effettuate Riprese e Foto con Telecamera senza filo e macchina fotografica				
Inizio Riprese ore	14,00	Coordinate	40° 29' 335 N 17° 14' 338 E	40° 28' 20",10 N 17° 15' 20",28 E	Profondità m 9 Tem. Acqua 14°
Termine Riprese ore	14,20	Venti	Moderati dai quadranti settentrionali		
Riprese effettuate con operatori subacquei con il metodo di ricerca a chiocciola. Ispezionata area circolare avente raggio di 10m					
Località	TARANTO	Sito	Primo Seno Mar Piccolo	Data	01.04.2014
Stazione 22	Effettuate Riprese e Foto con Telecamera senza filo e macchina fotografica				
Inizio Riprese ore	9,30	Coordinate	40° 29' 34 N 17° 14' 13 E		Profondità m 1,5 Temp. Acqua 16°
Termine Riprese ore	11,00	Venti	Dai quadranti settentrionali		
Riprese effettuate con operatori subacquei. Ispezionata anche l'area costiera in prossimità del punto					

Tabella 14

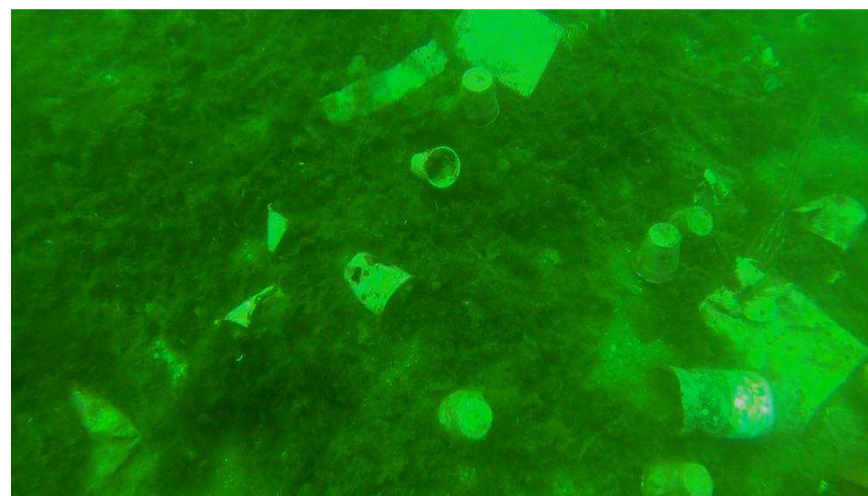


Figura 80. Area sud del 1° seno in prossimità dell'Arsenale della Marina Militare di stanza a Taranto.



Figura 81. Stazioni n. 9, n. 12 e n. 24.

In generale, per le stazioni dalla n. 1 alla n. 5, per la n. 9, n.12 e n. 24 non sono apparse situazioni particolarmente emblematiche se non di una condizione che complessivamente sottolinea un degrado generale dei fondali, costellati di rifiuti antropici vari (cavi, trovanti, corpi morti, suppellettili militari, ecc.) nella zona a ridosso dell'Arsenale della Marina Militare e di cospicui accumuli di gusci di mitili e di strumenti dedicati alla coltivazione dei mitili (ad es. reti, pali, ecc.) nelle zone in cui sono ancora presenti le palificate degli impianti di mitilicoltura.

Una considerazione a parte va tenuta per il rilievo condotto nell'intorno della stazione n. 22, posta in prossimità delle Idrovore dell'ILVA. Questa stazione è stato oggetto di approfondimenti in quanto, come emerso dalle analisi chimiche condotte, essa ha mostrato una serie di concentrazioni critiche per PCB ed IPA nelle acque, nonché un andamento del rilievo termico che può far ipotizzare la presenza di uno scarico attivo (Figura 82).

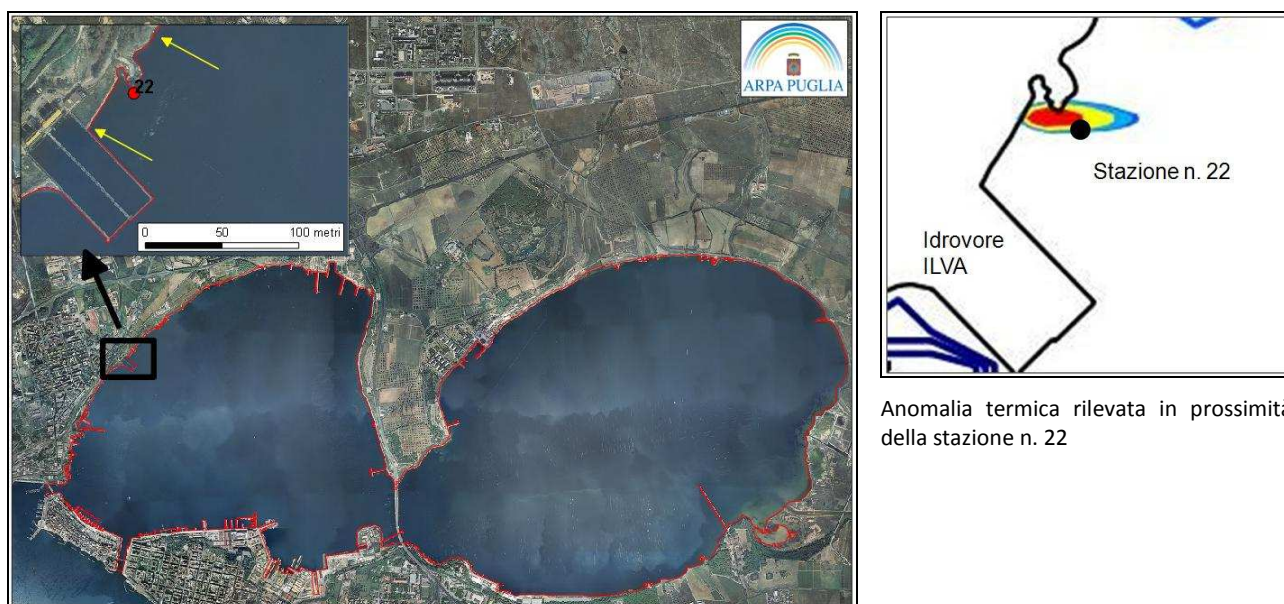


Figura 82

Il sopralluogo realizzato dal personale dei VVF in data 1 aprile 2014 è stato, pertanto, esteso lungo un tratto di costa posto tra le Idrovore dell'ILVA ed una piccola propaggine della costa (Figura 82). Il risultato è stato l'individuazione, lungo la massicciata di costa, di una condotta apparentemente in disuso, arrugginita e coperta allo sbocco da reti da pesca (Figura 83 e Figura 84). Nella parte a terra, subito a monte della condotta, la massicciata delimita un'area che si configurerebbe come di riempimento/colmata. A vista quest'area mostra in superficie la presenza di pietrisco unito ad una matrice pietrosa più fine ed evidenti segni di brevi corrivazioni superficiali, che partono dallo spigolo della muraglia che delimita la struttura delle Idrovore dell'ILVA e seguono la pendenza dell'area verso la massicciata di delimitazione. Qui l'accumulo delle acque lascia traccia con un materiale più fangoso (Figura 85). In corrispondenza dello spigolo del muro di cinta delle Idrovore dell'ILVA si riscontra la presenza dello sbocco di un tubo e di una pseudo cavità con materiale di riporto e pietroso. In entrambi i casi è evidente che da tali aperture fluisca acqua i cui segni sono, appunto, le corrivazioni superficiali citate (Figura 85). Sull'area a terra sono presenti anche due grossi pezzi di tubazione evidentemente abbandonati e corrosi dalla ruggine, di cui uno potrebbe essere di sezione paragonabile alla condotta presente in massicciata ed in uscita in mare (Figura 86).

Da una verifica condotta presso gli archivi del Dipartimento Provinciale ARPA di Taranto, tale condotta rilevata non sembrerebbe apparentemente associabile ad alcuno degli scarichi ad oggi censiti e recapitanti

ancora in Mar Piccolo (Tabella 15 e Figura 87). Ci si è, conseguentemente, attivati presso gli Uffici della Provincia di Taranto preposti per reperire le informazioni del caso ed in Figura 89 sono indicati, per il 1° seno, gli scarichi al momento presenti (Tabella 16).



Figura 83

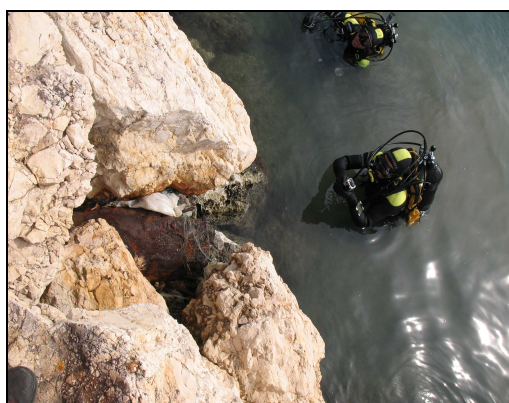


Figura 84



Figura 85



Figura 86

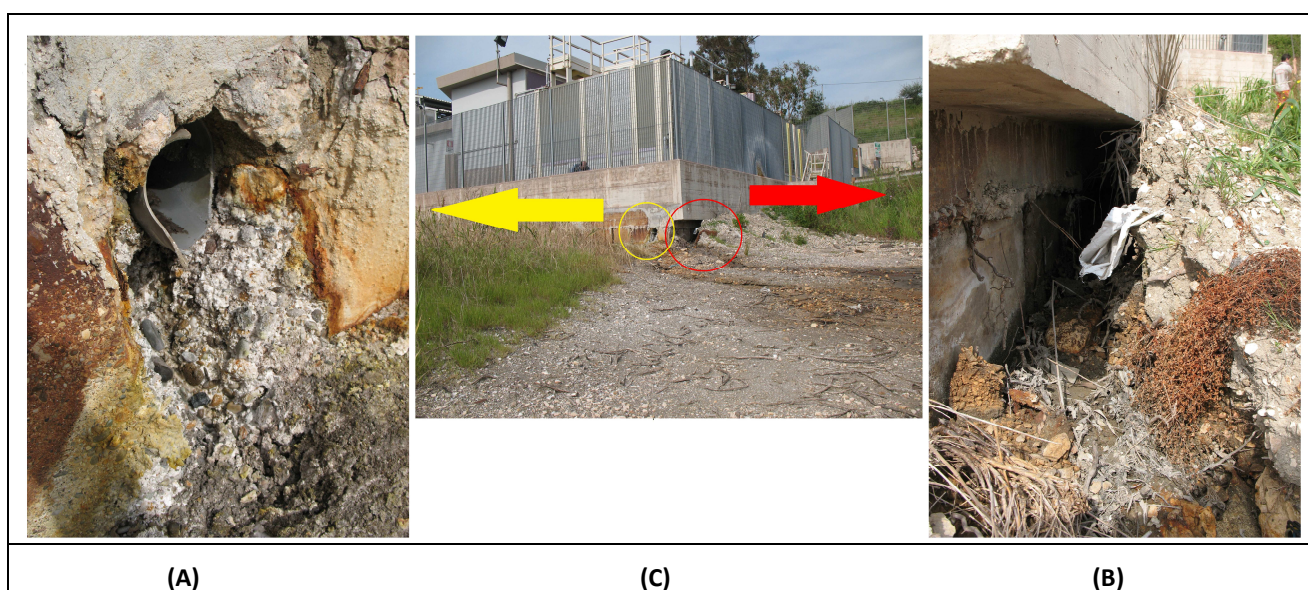


Figura 87

TITOLARE e DENOMINAZIONE dello SCARICO	N° SCARICHI	N° CONTROLLI	N° SUPERAMENTI PARAMETRI ANNO 2008	RECAPITO FINALE SCARICHI
Compartimento Marina Militare (M.M.)	2	11		Mar Piccolo
Arsenale	1	6	0 - Nessuno	
Scuola M.M. (Marimuni)	1	5	0 - Nessuno	
Compartimento Aeronautica Militare	2			Mar Piccolo
Scuola Volont. Truppe A.M. (SVTAM)	1	4	n.1-S.S., n.1-Az.Nitrico	
65° Deposito	1	5	n.5-Azoto Nitrico	
Consorzio ASI				Mar Piccolo
Collettore Piccole industrie	1	5	0 - Nessuno	

Tabella 15. Indicazione degli scarichi in Mar Piccolo.

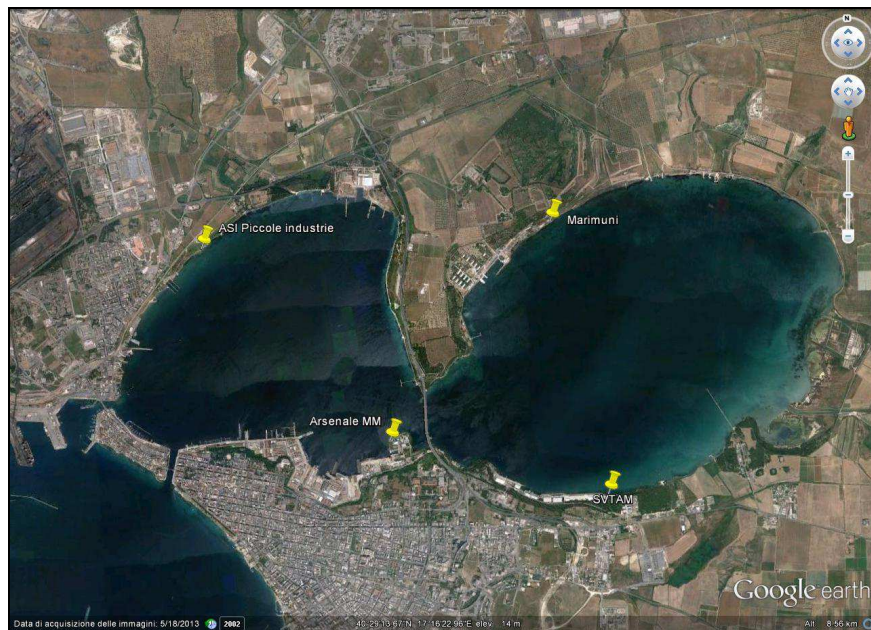


Figura 88

Scarichi autorizzati (attivi o non attivi)			
Riferimento scarico in Figura 89	Nome	Coordinate geografiche	
		Latitudine	Longitudine
1	Depuratore Arsenale MM	40°29'29.48"N	17°15'53.72"E
2	Scarico depuratore reflui industriali LEDE SpA	40°29'26.35"N	17°15'53.75"E
3	Condotta ASI piccole industrie	40°29'43.45"N	17°14'26.39"E
Scarichi di acque meteoriche presenti in prossimità dell'Arsenale MM			
Riferimento scarico in Figura 89	Nome	Coordinate geografiche	
		Latitudine	Longitudine
4	Scarico Casotto Guardie P.Torpediniere	40°28'31.04"N	17°14'14.60"E
5	Scarico esistente nei pressi del "Piccolo tonnellaggio Darsena Sommergibili"	40°28'33.29"N	17°15'7.92"E
6	n. 9 scarichi esistenti e da eliminare in prossimità della Banchina Unità ai Lavori, adiacenti al punto 5 in Figura ...		
7	Scarico esistente da adeguare (intervento 13)	40°28'18.22"N	17°15'36.96"E
8	Scarico esistente da adeguare (intervento 9)	40°28'29.04"N	17°15'42.32"E
9	Scarico esistente da adeguare (intervento 10)	40°28'23.98"N	17°15'53.60"E
10	Scarichi esistenti da adeguare (intervento 12 e intervento 15)	40°28'32.65"N	17°15'58.02"E
11	Scarico esistente da adeguare (intervento 16)	40°28'32.15"N	17°16'1.49"E

Tabella 16



Figura 89

Attività di sopralluogo in località Citrello

Un'altra area in cui le evidenze analitiche sullo stato di qualità della colonna d'acqua hanno fatto emergere una serie di criticità, è quella a ridosso degli ex Cantieri Navali Tosi, allo sbocco del torrente Citrello e del citro omonimo, nel settore nord del 1° seno.

Anche qui è stato realizzato un sopralluogo da parte del personale ARPA, in data 06/03/2014. Nella Figura 90 si evince come il canale Citrello, almeno per il tratto terminale, presenta una situazione di sostanziale abbandono con accumulo di rifiuti alla confluenza nel 1° seno. Si segnala, inoltre, nel primissimo tratto di costa in destra idraulica a sud della foce del Citrello, la presenza nella banchina di margine, di uno scarico che, almeno il giorno in cui è stato eseguito il sopralluogo, recapitava in mare cospicui carichi d'acqua e di cui non è ben chiara l'origine.



Figura 90

3.2. FONTI SECONDARIE (SEDIMENTI)

3.2.1. *Ulteriori considerazioni sulla presenza di metalli e PCB nei sedimenti (a cura del CNR IAMC di Taranto)*

Lo stato di contaminazione dei sedimenti di alcune zone del Mar Piccolo ed in particolare per quelli del 1° seno è stato evidenziato in diversi studi e confermato anche a seguito della realizzazione dei piani di caratterizzazione ambientale finalizzati alla definizione degli interventi di bonifica dei sedimenti nel SIN di Taranto.

La possibilità che tali sedimenti rappresentino una “sorgente” attiva, ancorché secondaria, di contaminazione, e sotto quali condizioni ambientali ciò sia verosimile, è stato oggetto delle attività di studio condotte dal CNR IAMC di Taranto di cui all’Allegato 7. A questo scopo sono stati campionati anche i sedimenti presenti nelle due stazioni (cfr. “stazione 1” e “stazione 2”), localizzate nell’area individuata come maggiormente contaminata (c.d. “Area 170 ha”) (Figura 91). Le stesse stazioni sono quelle in cui sono stati condotti gli esperimenti di bioaccumulo nei mitili (scelti come organismi bioindicatori) a seguito di processi di risospensione, e i cui risultati saranno discussi nelle successive sezioni di questa relazione.



Figura 91

Dal punto di vista granulometrico entrambe le stazioni mostrano sedimenti appartenenti alla categoria delle “peliti sabbiose”, in quanto la percentuale di sabbia presente è compresa tra il 5 e il 30%. In particolare il sedimento della stazione 1 è caratterizzato dal 6.2 % di “ghiaia”, costituita prevalentemente da materiale di natura biogenica, dal 20.0 % di sabbia e da circa il 74 % di pelite (silt e argilla), mentre il sedimento della stazione 2 è risultato caratterizzato da una suddivisione granulometrica simile a quella della stazione 1, ovvero 7 % di materiale biogenico, 15 % di sabbia e 78 % di pelite.

	Prof. (m)	pH	Eh (mV)	% acqua	O.M p.s. %*
Stazione 1	11.40	7.87	-350	65	14.66
Stazione 2	10.80	7.56	-373	63	13.89
* materia organica peso secco					
	Ghiaia		Sabbia		Pelite
Granulometria	$\phi > 2\text{mm}^*$	$0.063 \text{ mm} < \phi < 2\text{mm}$		$\phi < 0.063 \text{ mm}$	
Stazione 1	6.2 %	20.0 %		73.8 %	
Stazione 2	7.1 %	14.7%		78.2 %	
* costituita da materiale biogenico					

Tabella 17

Determinazione dei metalli

Le concentrazioni di metalli determinata nei sedimenti e nella frazione pelitica di entrambe le stazioni sono riportati in Tabella 18. I sedimenti della stazione 1 hanno mostrato concentrazioni di Cromo, Ferro, Alluminio e Vanadio più elevate rispetto ai sedimenti della stazione 2, mentre i sedimenti della stazione 2 hanno evidenziato dei livelli di Arsenico, Rame, Zinco, Piombo e, soprattutto, Mercurio più alti rispetto ai sedimenti della stazione 1. La distribuzione percentuale dei metalli nella frazione pelitica è risultata più o meno confrontabile nei sedimenti delle due stazioni; in particolare il contributo dei metalli in questa frazione è risultato del 30-40% per As, Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Al e V, del 50-60% per Zn, Pb, Mn, Se, Hg mentre 13-16% per il Se. Le concentrazioni di Arsenico, Rame, Piombo, Zinco e Mercurio nelle due stazioni sono risultate, inoltre, superiori ai valori di intervento proposti dall'ISPRA (As 20 mg/Kg p.s.; Hg 0.8 mg/Kg p.s.; Pb 50 mg/Kg p.s.; Cu 45 mg/Kg p.s.; Zn 110 mg/Kg p.s.).

METALLI	Stazione 1 (mg/Kg p.s.)	Frazione < 63µm (%)	Stazione 2 (mg/Kg p.s.)	Frazione < 63µm (%)
Arsenico	34.36	35	115.30	39
Cadmio	4.29	30	1.69	28
Cromo	133.41	34	77.84	38
Rame	177	38	536	43
Ferro	49653	38	28513	42
Nichel	75.76	39	54.73	45
Zinco	430	50	815	57
Piombo	121	64	392	70
Alluminio	38672	33	22803	38
Manganese	439	51	386	57
Stagno	15.31	13	6.82	16
Vanadio	134.37	31	72.84	34
Selenio	5.92	52	2.01	47
Mercurio	5.37	64	40.61	75

Tabella 18. Concentrazione di metalli nei sedimenti e percentuale di metalli nella frazione pelitica.

Per quanto riguarda la determinazione della frazione biodisponibile dei metalli presenti nei sedimenti sono state condotte le determinazioni dei solfuri acidi volatili (AVS) e dei metalli simultaneamente estraibili (SEM), nonché la valutazione della potenziale tossicità dei sedimenti attraverso la valutazione del rapporto molare SEM/AVS.

Le concentrazioni dei AVS sono risultate tipiche di ambienti fortemente anossici ($E_h = -350$ e -370 mV rispettivamente nella stazione 1 e 2). Il rapporto SEM/AVS è risultato notevolmente inferiore ad 1 sia nella stazione 1 (SEM/AVS = 0.09) che nella stazione 2 (SEM/AVS = 0.11).

Conseguentemente, in condizioni indisturbate la biodisponibilità dei metalli sarebbe verosimilmente piuttosto bassa, con conseguente scarsa probabilità di effetti avversi nei confronti degli organismi acquatici (bioaccumulo). Questo risultato deriva dal fatto che i metalli tendono facilmente a formare solfuri insolubili e rimanere, pertanto, “confinati” nei sedimenti. Eventi di risospensione e/o bioturbazione di diversa natura e entità possono però indurre l’ossidazione dei solfuri metallici, con conseguente possibile rilascio di metalli nella colonna d’acqua e accumulo da parte del biota.

L’analisi di “speciazione chimica” per i metalli è stata condotta con il metodo delle estrazioni sequenziali secondo il metodo descritto da Tessier et al. (1979), mentre per la speciazione del mercurio è stata utilizzata la procedura proposta da Bloom et al. (2003).

Il metodo delle estrazioni sequenziali individua, in ordine di biodisponibilità decrescente, cinque frazioni geochimiche: i metalli scambiabili (F1), quelli legati ai carbonati (F2), quelli legati agli ossidi di ferro e manganese (F3), quelli associati alla materia organica e ai solfuri (F4) e quelli associati alla frazione residua (F5). La frazione F1 evidenzia gli elementi associati debolmente (o adsorbiti) ai costituenti maggiori dei sedimenti: argille, ossidi idrati di Fe e Mn, acidi umici. Le quantità di metalli determinate in questa frazione forniscono previsioni sui metalli scambiabili per cambiamenti della composizione ionica dell’acqua con effetti di adsorbimento e desorbimento. La frazione F2 evidenzia gli elementi associati ai carbonati, che possono tornare in soluzione per cambiamenti di pH. La frazione F3 evidenzia gli elementi associati agli

ossidi di Fe e Mn che possono essere scambiati per variazioni delle condizioni ossido-riduttive del sedimento. La frazione F4 evidenzia gli elementi legati alla materia organica (complessazione dei metalli da parte della materia organica, acidi umici e fulvici); in questa frazione si ritrovano anche i metalli legati ai solfuri. La frazione F5 contiene metalli associati a minerali prevalentemente insolubili.

Per la determinazione della speciazione del Mercurio si individuano cinque frazioni principali: la frazione F1 nella quale è solubile in acqua o lisciviabile con acqua deionizzata; la frazione F2 in cui è solubile negli acidi o lisciviabile con acido acetico; la frazione F3 nella quale il Mercurio è legato alla sostanza organica (specie organo-chelate) lisciviabile con KOH 1N; la frazione F4 in cui è fortemente complessato, quindi risulta come Mercurio elementare e/o legato a composti organici amorfi contenenti zolfo, amalgame Hg-Ag o fasi cristalline di ossidi di Fe/Mn) lisciviabili con HNO₃ 12N; la frazione F5 nella quale è legato ai solfuri lisciviabile con acqua regia. Anche in questo caso all'aumentare del valore F diminuisce la biodisponibilità dell'elemento.

I risultati delle analisi di speciazione non hanno evidenziato differenze significative nella distribuzione percentuale delle differenti frazioni geochimiche nelle due stazioni. Il Rame è influenzato principalmente dalla materia organica (sostanze umiche ed aminoacidi) e nel caso specifico è risultato legato per l'80% alla sostanza organica. Il Cromo, Vanadio e Nichel, si ritrovano principalmente nella frazione residua (circa 70%) facendo presupporre la loro origine dalla disgregazione della roccia madre. Il Piombo si ritrova essenzialmente legato agli ossidi di Fe e Mn (60 % circa) e, a seguire, una buona percentuale si ritrova nella sostanza organica (25 % circa). Il basso contenuto di Piombo nella frazione residua, potrebbe confermarne l'origine antropogenica. Il Piombo è particolarmente solubile nell'acqua e diventa biodisponibile per bassi valori di pH, ridotti contenuti di materia organica e basse concentrazioni di Ferro, Manganese, Zinco e Calcio. Il Piombo è anche in grado di formare solfuri metallici insolubili che si complessano facilmente con gli acidi umici. Lo Zinco presenta un comportamento molto simile al Piombo. La biodisponibilità dello Zinco è influenzata principalmente dalla concentrazione dei solfuri, di conseguenza, in una matrice caratterizzata da un'alta concentrazione degli stessi, tale elemento sembrerebbe totalmente sequestrato nei sedimenti, specie considerando le forti condizioni riducenti caratteristiche di questo ambiente. L'Arsenico è risultato legato principalmente alla materia organica e residua (50% e 40% circa rispettivamente). Il tasso di metilazione dell'Arsenico è fortemente influenzato dal contenuto di materia organica presente nei sedimenti e dalla presenza di batteri solfato riduttori, Pertanto, un evento di risospensione potrebbe influire sulla mobilità e sulla biodisponibilità di queste forme chimiche. La maggior parte del Manganese (circa 70 %) è presente sotto forma di ossidi. I risultati sono illustrati in Figura 92 nei grafici sottostanti.

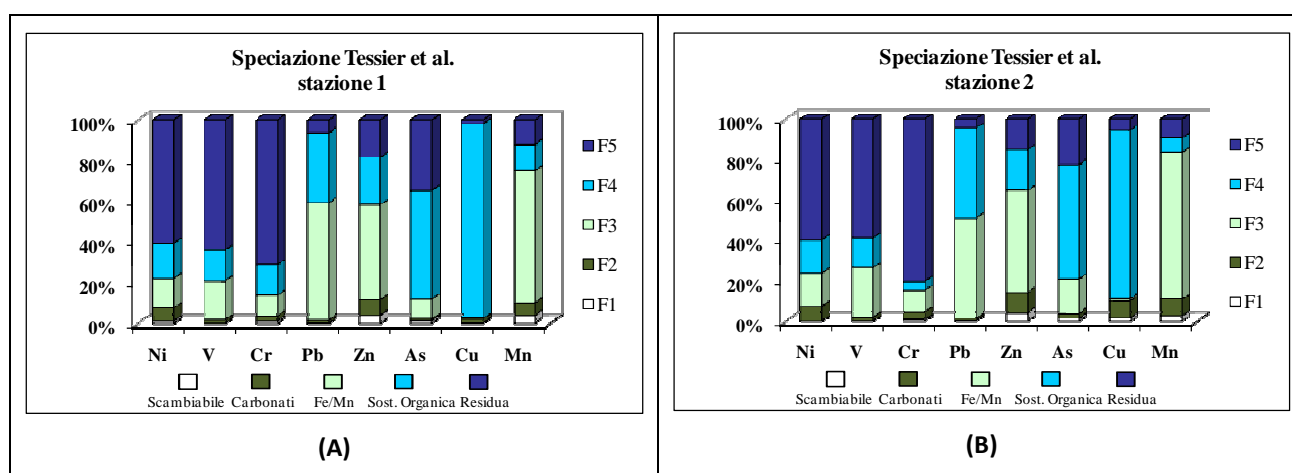


Figura 92. Risultati delle analisi di speciazione (secondo l'approccio di Tessier) rispettivamente per (A) Stazione 1 e (B) Stazione 2.

Per quanto riguarda la speciazione del Mercurio, la maggiore percentuale del metallo (fino al 90 %) si riscontra, in entrambe le stazioni, nella frazione F4, comprendente tutte le specie fortemente complessate di Mercurio. La frazione di Mercurio legato alla sostanza organica, è piuttosto bassa, a confronto con il Mercurio elementare Hg(0). Questa frazione comprende anche il Metilmercurio (Figura 93). E' ragionevole quindi pensare, alla luce di questa analisi di speciazione, che la quantità di Metilmercurio nel sedimento sia piuttosto bassa rispetto al Mercurio totale come confermato anche da studi pregressi nella medesima area.

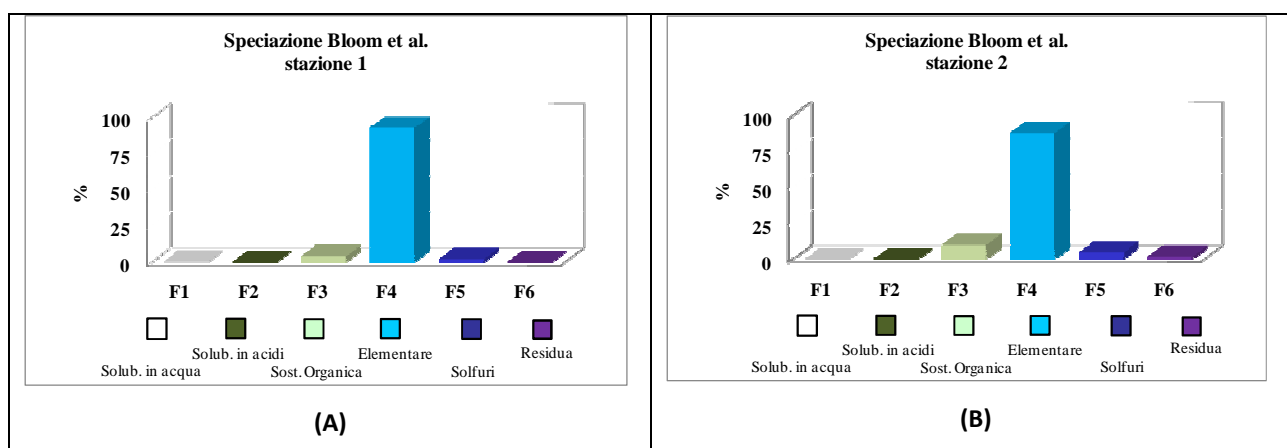


Figura 93. Risultati delle analisi di speciazione (secondo l'approccio di Tessier) rispettivamente per (A) Stazione 1 e (B) Stazione 2.

Nel complesso i risultati della speciazione suggeriscono che il potenziale redox dei sedimenti rappresenta uno dei principali fattori che influisce sulla speciazione dei metalli.

Determinazione dei PCB

Per quanto riguarda le concentrazioni dei PCB determinate nei sedimenti, la stazione 2, con un valore di 3.278 ng/g p.s., è risultata notevolmente più contaminata della stazione 1 (1.986 ng/g p.s.). In entrambi i sedimenti, tutti i congeneri, hanno presentato valori determinabili (Tabella 19).

Tali valori sono superiori al limite di intervento proposto dall'ISPRA per le bonifiche nel SIN di Taranto, pari a 190 µg/Kg p.s. (somma dei PCB 28, 52, 77, 81, 95, 99, 101, 105, 110, 118, 126, 128, 138, 146, 149, 151, 153, 156, 169, 170, 177, 180, 183, 187). Secondo queste indicazioni e, tenendo conto dei congeneri determinati in questo studio, i sedimenti analizzati superano ampiamente i citati limiti e confermano l'elevato grado di contaminazione presente almeno per l'area a sud del I seno del Mar Piccolo.

Sempre in Tabella 19 viene riportato anche il contributo, espresso in %, che la frazione pelitica determina per la contaminazione totale da PCB nei sedimenti. Le frazioni pelitiche (<63µm), rappresentano una componente determinante in entrambe le stazioni, sia da un punto di vista granulometrico, perché costituiscono la frazione più abbondante, sia per quel che concerne il contenuto di inquinanti in esse presenti, che risulta essere significativo. Nella stazione 2, in particolare, la frazione pelitica contribuisce al 52 % dei PCB presenti nel sedimento tal quale.

Sedimento		
PCB (ng/g p.s.)	stazione 1	stazione 2
18	2.4	8.3
31	2.9	21.7
28	5.9	22.9
52	74.2	168.7
44	17.1	33.5
95	82.2	170.5
101	100.8	187.4
99	80.4	154.0
110	116.4	225.9
151	53.2	88.1
123	3.2	5.2
149	157.3	290.8
118	122.9	193.9
114	1.2	3.2
146	37.7	72.4
153	261.3	385.8
105	38.7	41.8
138	237.5	302.9
187	126.7	212.8
183	43.1	65.2
128	30.2	79.0
167	7.1	42.4
177	42.5	64.8
156	15.6	27.2
157	5.1	12.2
180	220.0	273.8
170	97.3	117.7
189	3.3	5.8
PCB $\Sigma 28$	1986	3278
PCB frazione <63 μm (%)	43	52

Tabella 19. Concentrazione dei PCB nei sedimenti delle stazioni del Mar Piccolo.

3.2.2. Effetti della risospensione dei sedimenti sulla disponibilità di contaminanti (a cura del CNR IAMC di Taranto)

Un altro aspetto da tener presente nella valutazione dei sedimenti come potenziale sorgente (secondaria) attiva, ancorché secondaria, di contaminazione è la possibilità che fenomeni di risospensione, di tipo naturale (ad es. mareggiate, bioturbazione, ecc.) o antropico (ad es. movimentazione dei fondali indotta dalla navigazione, ecc.), cambiando le condizioni redox e di pH nel sistema, possano provocare un ricircolo e disponibilità di contaminanti nel medesimo sistema.

A tal fine, sempre nell'ambito delle attività di studio sulla biodisponibilità dei contaminanti inorganici ed organici condotte dal CNR IAMC di Taranto, sono stati svolti in laboratorio esperimenti di risospensione simulata impiegando campioni di sedimento (3 kg) prelevati dalla stazione 2 (Figura 94) e risospesi in acqua di mare (15 l), per determinare le concentrazioni di metalli e PCB sia nella fase disciolta sia in quella particellata. Dopo 15 minuti di agitazione meccanica, il sistema è stato lasciato a riposo per 3 ore (simulando il tempo corrispondente a mezzo ciclo mareale) e, successivamente, sono stati prelevati i campioni d'acqua su cui eseguire le determinazioni previste.

Nella Tabella 20 si riportano i valori di concentrazione dei metalli nella frazione disciolta e nel particellato, rispettivamente all'inizio dell'esperimento (tempo T=0) e dopo tre ore dalla risospensione (T=3). Nell'acqua di mare, prima dell'esperimento di risospensione (Tempo = 0), tutti i metalli, ad eccezione del Manganese, sono risultati più alti nel disciolto. Alla fine dell'esperimento di risospensione (Tempo = 3 ore) si è notato come i livelli di metalli nel particellato sono incrementati notevolmente rispetto ai livelli presenti nel

disciolto. La quantità di particellato ottenuta dopo la filtrazione di 1 litro di acqua è aumentata da 0.02 a 0.15 g in peso secco. In Figura 94 sono riportati i grafici, rispettivamente, le distribuzioni di Cadmio, Rame, Nichel, Piombo e Mercurio nel disciolto (D) e nel particellato (P) prima e dopo l'esperimento di risospensione (T = 0; T = 3 ore) e le distribuzioni di Manganese e Zinco nel disciolto (D) e nel particellato (P) prima e dopo l'esperimento di risospensione (T = 0; T = 3 ore).

	Acqua di mare			Acqua di mare DOPO risospensione		
	DISCIOLTO	PARTICELLATO		DISCIOLTO	PARTICELLATO	
	$\mu\text{g/L}$	$\mu\text{g/L}$	$\mu\text{g/g}$	$\mu\text{g/L}$	$\mu\text{g/L}$	$\mu\text{g/g}$
Cadmio	0.03	0.02	0.85	0.05	0.41	2.70
Rame	1.50	0.46	23.09	0.21	7.93	52.88
Ferro	23.58	15.81	31.61	16.83	2442.88	4885.76
Manganese	0.43	1.55	77.43	42.01	34.82	232.13
Nichel	0.83	ND	ND	0.30	4.89	32.60
Piombo	0.23	0.02	3.87	0.41	0.15	90.10
Zinco	5.31	1.42	70.98	15.11	23.66	157.77
Mercurio	ND	ND	ND	ND	0.79	5.27

Tabella 20

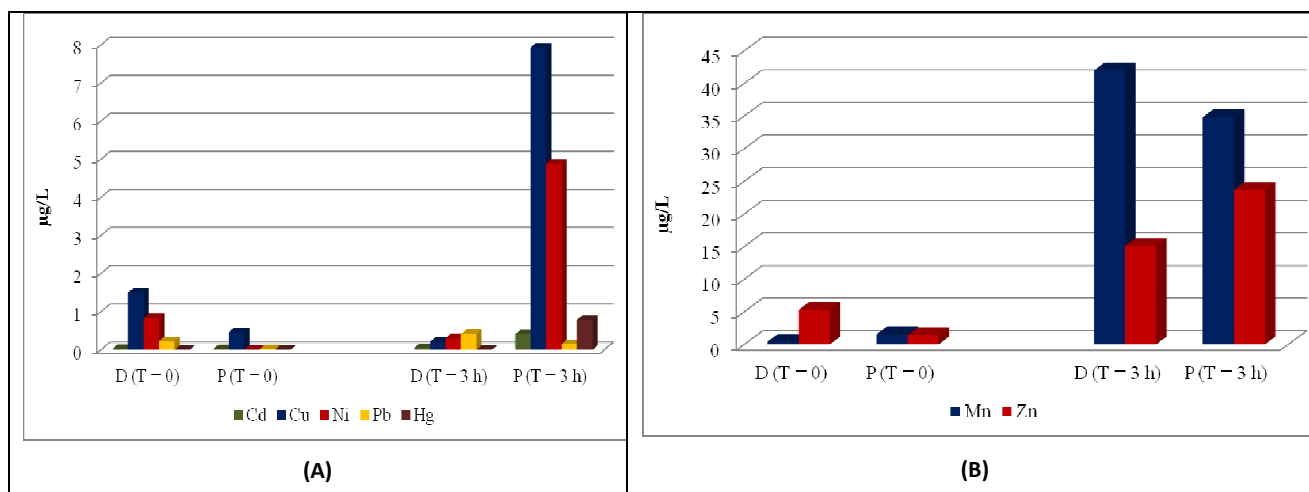


Figura 94. (A) distribuzione di Cadmio, Rame, Nichel, Piombo e Mercurio e (B) di Manganese e Zinco nel disciolto (D) e nel particellato (P) prima e dopo l'esperimento di risospensione (T = 0; T = 3 ore).

In Tabella 21 sono indicati i risultati emersi per i livelli di PCB determinati nella frazione "disciolta" (D) e "particellata" (P) del campione di acqua, prima dell'esperimento di risospensione (T = 0) e dopo (T=3 ore). All'inizio dell'esperimento (T=0) le concentrazioni presenti nella frazione "disciolta", seppure relativamente basse, sono state circa 3 volte maggiori di quelle riscontrate nella frazione "particellata" (Figura 95). Dopo (T=3 ore) le frazioni "disciolta" e "particellata" hanno mostrato un forte incremento e cambiamento, sia per quanto concerne le concentrazioni dei PCB (al T=3 ore l'incremento è stato di circa 10 volte per la frazione disciolta e di circa 100 volte nella frazione particellata) sia per la distribuzione dei singoli congeneri (Figura 96; si noti la variazione dell'ordine di grandezza della scala di concentrazione rispetto alla precedente immagine).

ACQUA DI MARE				ACQUA DI MARE DOPO RISOSPENSIONE			
D		P		D		P	
PCB	ng/l	ng/l	ng/g dw	PCB	ng/l	ng/l	ng/g dw
18	ND	ND	ND	18	0.24	0.12	0.5
31	0.06	ND	ND	31	0.23	1.05	4.4
28	0.07	ND	ND	28	0.21	1.05	4.4
52	0.13	0.03	1.8	52	1.41	5.17	23.5
44	0.05	ND	ND	44	0.42	0.96	4.0
95	0.10	ND	ND	95	0.95	5.60	23.3
101	0.09	0.07	4.0	101	0.74	6.44	26.8
99	0.03	ND	ND	99	0.49	5.73	23.9
110	0.05	ND	ND	110	0.83	8.24	34.3
151	ND	ND	ND	151	0.33	3.85	16.1
123	ND	ND	ND	123	0.03	0.23	1.0
149	0.07	ND	ND	149	0.93	12.26	51.1
118	0.05	0.03	1.8	118	0.52	8.11	33.8
114	ND	ND	ND	114	ND	0.10	0.4
146	ND	ND	ND	146	0.18	3.12	13.0
153	0.06	0.05	2.8	153	0.96	16.90	70.4
105	ND	ND	ND	105	0.12	1.49	6.2
138	0.05	0.03	1.8	138	0.70	13.29	55.4
187	ND	ND	ND	187	0.59	10.28	42.8
183	ND	ND	ND	183	0.17	2.91	12.1
128	ND	ND	ND	128	0.13	2.42	10.1
167	ND	ND	ND	167	0.04	0.61	2.6
177	ND	ND	ND	177	0.16	3.13	13.0
156	ND	ND	ND	156	0.06	1.17	4.9
157	ND	ND	ND	157	ND	0.51	2.1
180	0.03	0.03	1.8	180	0.67	5.50	22.9
170	ND	ND	ND	170	0.27	0.20	0.8
189	ND	ND	ND	189	ND	0.66	2.7
PCB Σ 28	0.83	0.24	14.0	PCB Σ 28	11.38	121.08	504.50

Tabella 21. Livelli dei PCB nella frazione “disciolta” (D) e “particellata” (P) al tempo T=0 ed al tempo T= 3 ore (dopo la risospensione).

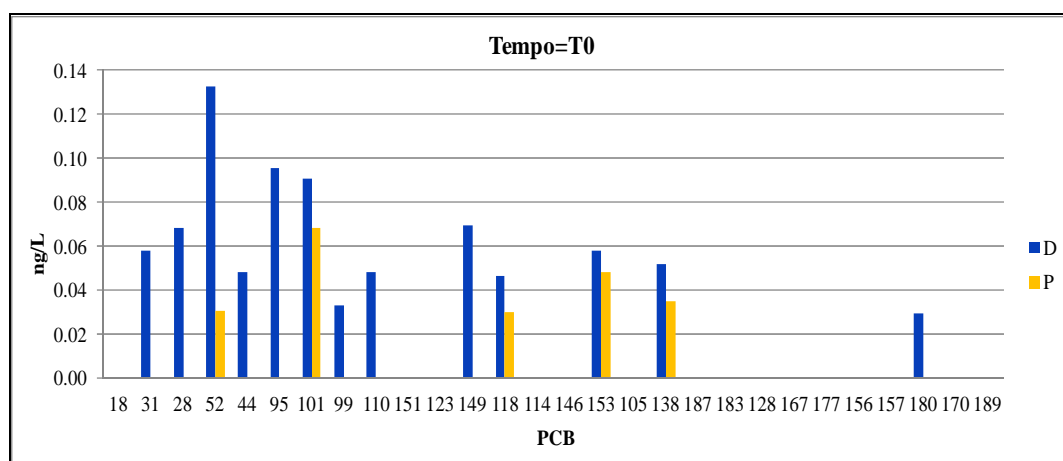


Figura 95. Distribuzione dei congeneri di PCB nella frazione “disciolta” (D) ed in quella “particellata” (P) nell’acqua di mare utilizzata per l’esperimento di risospensione (Tempo = 0).

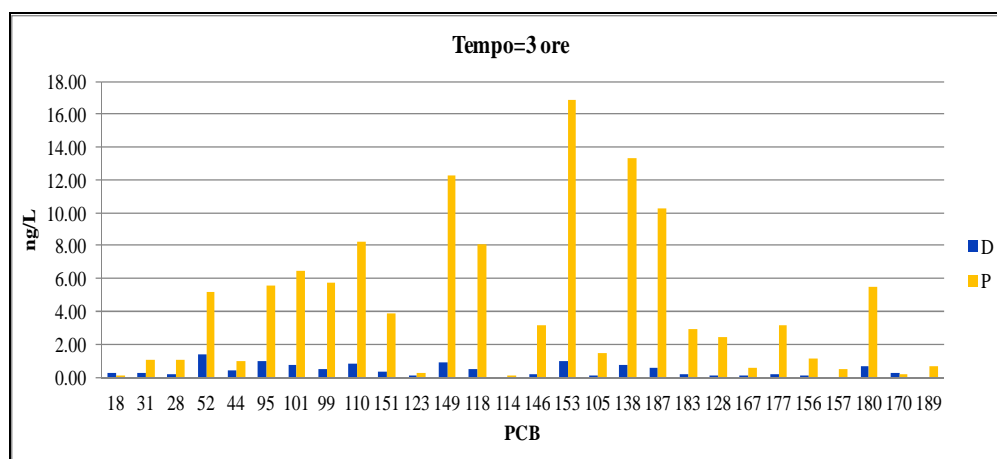


Figura 96. Distribuzione dei congeneri di PCB nella frazione “disciolta” (D) ed in quella “particellata” (P) nell’acqua di mare utilizzata per l’esperimento di risospensione (Tempo = 3 ore).

3.2.3. Presenza di metalli e PCB nei sedimenti delle sorgenti subaeree (a cura del CNR IAMC di Taranto)

Nell’ambito dell’attività inerente la “Stima dei flussi di PCB in ingresso nel Mar Piccolo anche attraverso la mappatura e l’analisi di acque delle sorgenti sottomarine (Citri) e degli apporti fluviali”, svolta dal CNR IAMC di Taranto, sono stati analizzati anche alcuni campioni di sedimento proveniente dalle stazioni ubicate in prossimità delle sorgenti a terra, quali: la sorgente Galeso, il canale Citrello, la sorgente Battentieri e la sorgente AIVAM.

Stazione	Data	Latitudine	Longitudine	O.M. % p.s.*	% acqua	red-ox mV	pH
sorgente Galeso	17.01.2014	40°30'8.22"N	17°14'42.61"E	7.0	50.0	-310.0	7.4
canale Citrello	17.01.2014	40°29'55.87"N	17°16'2.42"E	14.1	66.2	-350.0	7.8
sorgente Battentieri	17.01.2014	40°29'40.19"N	17°19'37.87"E	3.4	40.0	-247.0	7.3
sorgente "Aivam"	17.01.2014	40°28'52.36"N	17°19'35.07"E	5.0	62.1	-200.0	7.5

O.M. % p.s. = organic matter (%) in peso secco

Tabella 22

In Tabella 22, si può vedere come il potenziale redox abbia mostrato valori fortemente negativi per tutti i sedimenti campionati nelle sorgenti e nel canale Citrello con valori compresi tra -350 e -200 mV. Il valore più negativo è stato osservato in corrispondenza del canale Citrello, caratterizzato anche da un contenuto di materia Tabella 23 sono indicate i risultati per le analisi sui metalli da cui si evince come le concentrazioni di Cadmio e Zinco nei sedimenti del canale Citrello siano risultate superiori ai valori di intervento proposti da ISPRA (Cadmio 1 mg/Kg p.s. e Zinco 110 mg/Kg p.s.), mentre Rame e Piombo hanno concentrazioni vicino a tali valori (Rame 45 mg/Kg p.s. e Piombo 50 mg/Kg p.s.).

Stazioni	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Ni	Zn	Pb	Al	Mn	Sn	V	Se	Hg
	mg/Kg p.s.													
Sedimento Galeso	2.76	0.70	24.51	13.87	1936	12.24	22.50	14.49	16810	80.90	0.95	27.20	0.96	0.50
Sedimento Citrello	1.72	2.26	26.00	42.15	2118	25.96	197.70	48.92	17382	103.70	10.90	37.40	1.31	0.48
Sedimento Battendieri	3.86	0.22	21.44	9.03	1983	18.68	29.04	14.76	13231	121.44	0.79	28.51	0.69	0.08
Sedimento AIVAM	1.90	0.65	19.35	19.81	1785	9.95	29.90	6.10	15565	119.81	0.55	16.25	0.97	0.15

Tabella 23

I risultati delle determinazioni dei PCB (Tabella 24) mostrano come la somma dei 28 congeneri abbia valori compresi nel range 0.3-351 ng/g p.s.. La massima concentrazione di questi è stata riscontrata nei sedimenti del canale Citrello (congeneri più abbondanti sono stati gli esaclorobifenili PCB 153 e 138, con 36.8 e 35.3 ng/g p.s. rispettivamente), in cui si evidenzia il superamento dei valori di intervento proposti da ISPRA.

NOME IUPAC	PCB (ng/g ps)	Sorg. Galeso	Canale Citrello	Sorg. AIVAM	Sorg. Battendieri
2,2',5'-Trichlorobiphenyl	18	ND	11.2	ND	ND
2,4',5'-Trichlorobiphenyl	31	ND	13.1	ND	ND
2,4,4'-Trichlorobiphenyl	28	ND	14.4	ND	ND
2,2',5,5'-Tetrachlorobiphenyl	52	0.5	16.8	ND	ND
2,2',3,5'-Tetrachlorobiphenyl	44	ND	10.8	ND	ND
2,2',3,5',6-Pentachlorobiphenyl	95	0.8	30.8	ND	ND
2,2',4,5,5'-Pentachlorobiphenyl	101	0.7	30.6	ND	ND
2,2',4,4',5-Pentachlorobiphenyl	99	0.6	10.3	ND	ND
2,3,3',4',6-Pentachlorobiphenyl	110	2.0	30.4	ND	ND
2,2',3,5,5',6-Hexachlorobiphenyl	151	0.6	4.7	ND	ND
2,3',4,4',5'-Pentachlorobiphenyl	123	ND	1.2	ND	ND
2,2',3,4',5',6-Hexachlorobiphenyl	149	0.4	20.2	ND	ND
2,3',4,4',5-Pentachlorobiphenyl	118	0.6	21.5	0.6	ND
2,3,4,4',5-Pentachlorobiphenyl	114	ND	0.3	ND	ND
2,2',3,4',5,5'-Hexachlorobiphenyl	146	0.4	5.3	ND	ND
2,2',4,4',5,5'-Hexachlorobiphenyl	153	2.4	36.8	0.7	0.3
2,3,3',4,4'-Pentachlorobiphenyl	105	0.3	6.1	ND	ND
2,2',3,4,4',5'-Hexachlorobiphenyl	138	1.8	35.3	0.4	ND
2,2',3,4',5,5',6-Heptachlorobiphenyl	187	0.6	20.1	ND	ND
2,2',3,4,4',5',6-Heptachlorobiphenyl	183	0.2	12.4	ND	ND
2,2',3,3',4,4'-Hexachlorobiphenyl	128	0.3	5.1	ND	ND
2,3',4,4',5,5'-Hexachlorobiphenyl	167	ND	1.0	ND	ND
2,2',3,3',4,5',6'-Heptachlorobiphenyl	177	0.4	7.4	ND	ND
2,3,3',4,4',5-Hexachlorobiphenyl	156	ND	4.4	ND	ND
2,3,3',4,4',5'-Hexachlorobiphenyl	157	ND	1.6	ND	ND
2,2',3,4,4',5,5'-Heptachlorobiphenyl	180	1.04	28.4	ND	ND
2,2',3,3',4,4',5-Heptachlorobiphenyl	170	0.6	9.2	ND	ND
2,3,3',4,4',5,5'-Heptachlorobiphenyl	189	ND	0.2	ND	ND
PCB Σ 28		14.2	350.9	1.7	0.3

Tabella 24

4. VIE DI TRASPORTO

4.1. FALDA PROFONDA E FALDA SUPERFICIALE

Uno degli aspetti emersi dallo studio dell'andamento delle falde, in particolare la profonda, insieme alle caratteristiche idrologiche e geomorfologiche dell'area esaminata, è che il bacino del Mar Piccolo è il "naturale" recettore finale dei flussi d'acqua sotterranei, che presentano una cadenza piezometrica pari al 2‰ ed un rapido decremento delle altezze piezometriche, da quote superiori a 8 m a circa 10 Km da Mar Piccolo, a 1 m in prossimità della costa (Capitolo 2).

La falda profonda, risulta abbondantemente contaminata dal cuneo salino con evidenze via via maggiori avvicinandosi alla linea di costa, così come la sua propensione a generare risorgenze sia a terra sia in Mar Piccolo con i citri. La notevole antropizzazione dell'area ed il fatto che il bacino idrologico drenante abbia un'estensione di circa 900 Km² non la rende esente, quindi, da possibili e potenziali fenomeni di contaminazione diretta o attraverso l'interconnessione, naturale o antropica, con la/le falde superficiali.

Per quanto riguarda la falda/e superficiale/i, soggiacendo a profondità di molto inferiori rispetto a quella profonda, sono potenzialmente più a diretto contatto con matrici (suolo e acque) contaminate e, conseguentemente, possono essere loro stesse buoni vettori della contaminazione. Una evidenza in tal senso è rappresentata dalla falda superficiale localizzata sotto l'area industriale del SIN di Taranto, ad oggi l'unica area in cui è possibile avere dati sulle piezometrie che permettano modellazioni più accurate e, di conseguenza, migliori valutazioni sui livelli di contaminazione presenti e stime sui percorsi di migrazione potenziali. Un primo tentativo di modellizzare numericamente il flusso sotterraneo della falda superficiale è stato realizzato sempre nell'ambito dello Studio di fattibilità redatto da Sogesid precedentemente citato (Capitolo 2). In tale contesto, al fine di supportare la successiva fase riguardante la scelta del più idoneo intervento di messa in sicurezza, è stato definito un modello di flusso sperimentale (Figura 97), un bilancio di massa dei flussi in uscita dall'area esaminata (Figura 98) ed un modello di trasporto dei contaminanti, sulla base dell'integrazione degli *hot spot* di contaminazione accertati e del modello di flusso elaborato.

Dal modello di flusso sperimentale, si rileva come, anche grazie alle conformazioni orografiche ed alla tipologia litologica dell'area, parte del carico della falda superficiale ivi presente possa ripiegare verso il Quartiere Tamburi e, da questo, nel 1° seno del Mar Piccolo (Figura 99). Dal modello di propagazione/diffusione degli inquinanti questa considerazione trova una migliore interpretazione in quanto, in un orizzonte temporale medio (60 anni), si osserva un ampliamento e migrazione "naturale" della plume di contaminanti anche verso il 1° seno del Mar Piccolo. A titolo di esempio, in Figura 100, è riportata la stima della diffusione del benzene a 60 anni.

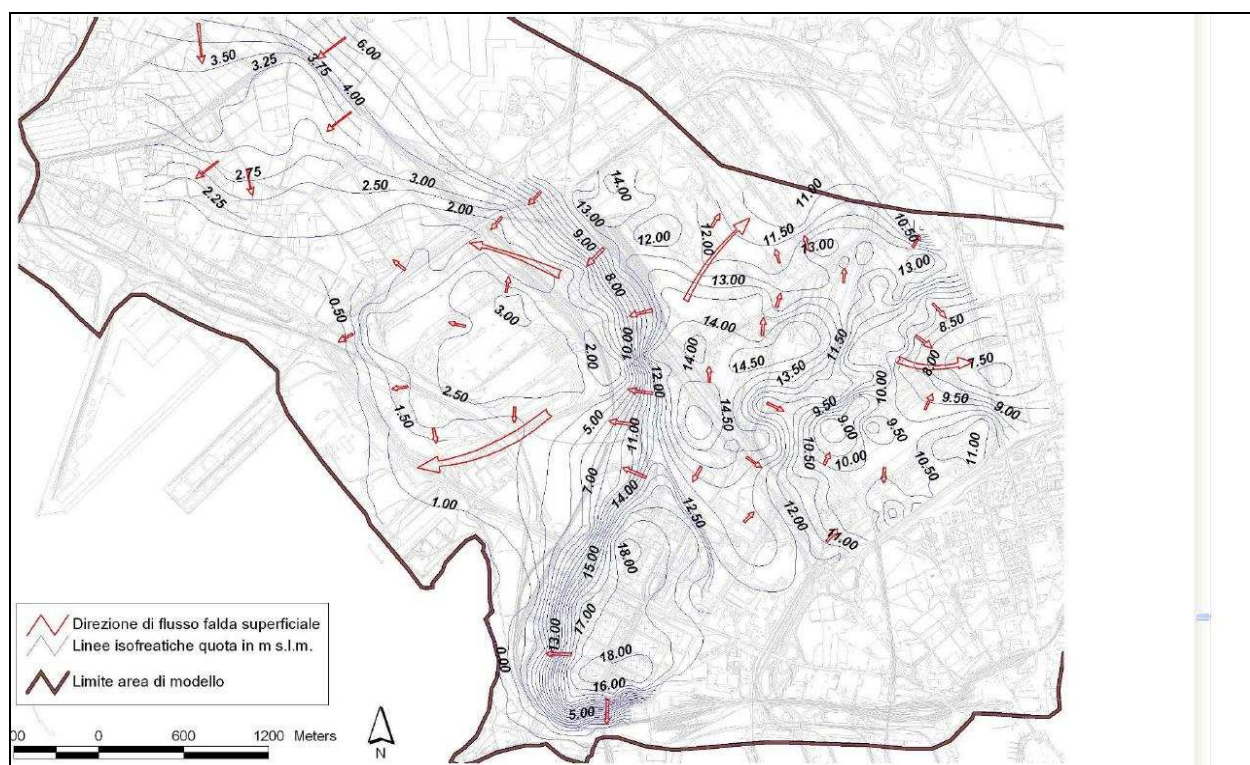


Figura 97

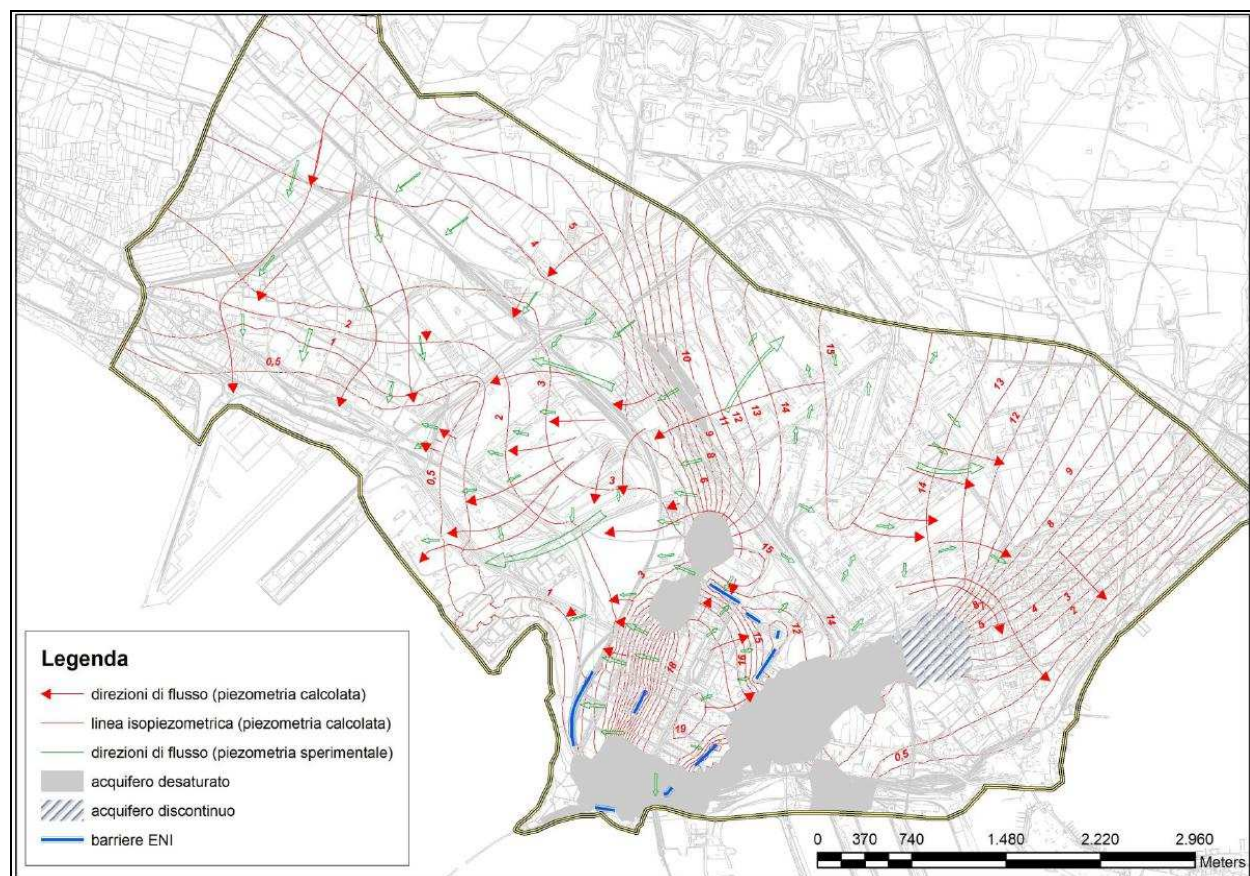


Figura 98

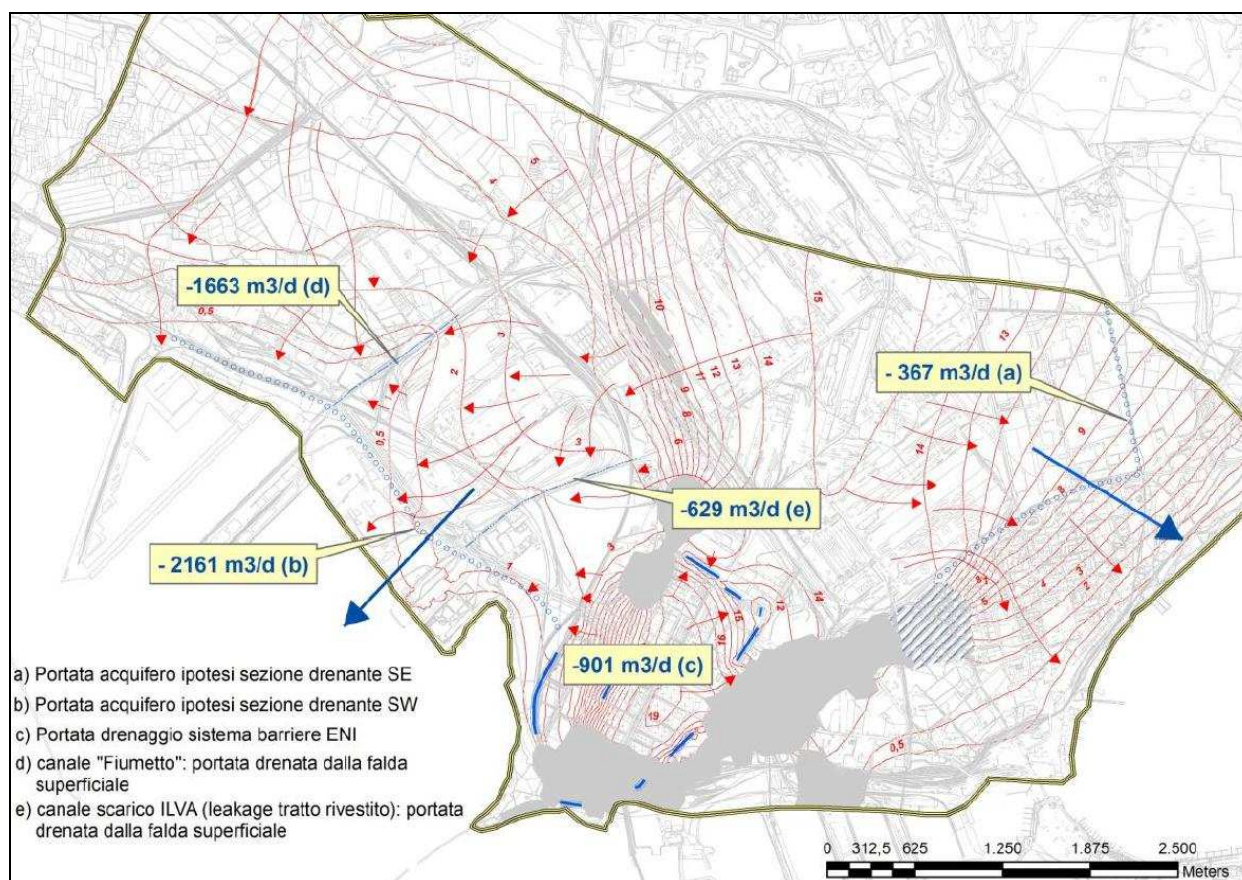


Figura 99

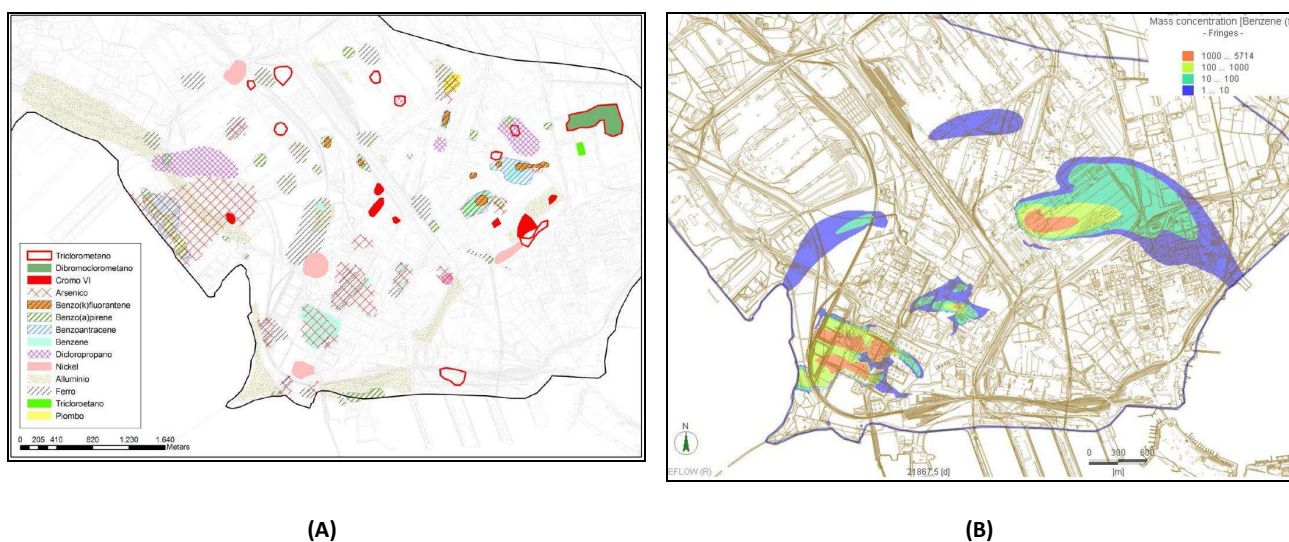


Figura 100. (A) Ubicazione degli hot spot di contaminazione rilevati nel SIN e (B) stima della diffusione del benzene a 60 anni.

4.2. STIMA DEI DEFLUSSI IDRICI/SOLIDI E CONSIDERAZIONI SULLA PROPENSIONE ALL'EROSIONE DEL SUBSTRATO (A CURA DEL POLITECNICO DI BARI)

Scopo di questa attività è stata la stima dei deflussi idrici/solidi attraverso l'applicazione di modelli idrologici afflussi-deflussi per il calcolo della portata idraulica, accoppiati a modelli per la stima del trasporto solido in grado di definire le portate idriche/solide da inserire nei modelli idraulici di propagazione del deflusso. Analogamente è stato condotto uno studio della propagazione in alveo (compreso il ruscellamento superficiale fuori alveo) applicando modelli di calcolo mono o bidimensionali (qualora la propagazione del flusso avvenga in più direzioni). In particolare, sulla base del reticolo idrografico individuato e del modello di afflusso/deflusso superficiale, sono stati individuati, in prima battuta, gli aspetti legati all'erosione idrica superficiale che caratterizza il bacino del Galeso e, quindi, è stata delineata la propensione naturale dello stesso a generare trasporto solido e a recapitarlo nel 1° seno del Mar Piccolo.

4.2.1. Stima dei deflussi idrici e delle aree soggette ad allagamento

La stima dei deflussi idrici e delle aree soggette ad allagamento è stata condotta con l'utilizzo di due diversi approcci metodologici che hanno comunque mostrato una sostanziale coerenza nei risultati circa l'attitudine delle aree alla generazione del deflusso superficiale. In particolare si è fatto ricorso all'utilizzo di descrittori fisici di bacino, quali l'*indice topografico*, per la definizione speditiva delle aree suscettibili all'allagamento, insieme ad un'apposita analisi idrologica ed idraulica del bacino del Galeso (bacino drenante in Mar Piccolo), con l'obiettivo di individuare i possibili punti critici di allagamento per eventi pluviometrici caratterizzati da differente frequenza di accadimento (o tempo di ritorno).

In Figura 101 si riportano le aree caratterizzate da un valore dell'indice topografico superiore ad una soglia prefissata che rappresenta una soglia di definizione delle aree propense alla generazione del deflusso.

L'analisi idrologica ed idraulica (*modello idrologico afflussi-deflussi*) ha un duplice obiettivo: fornire una procedura che permetta la valutazione dei contributi di portata di ruscellamento superficiale che defluiscono nel 1° seno e validare la metodologia adottata per la valutazione delle aree soggette ad allagamento, individuate dal descrittore di bacino indice topografico. Per quest'ultimo aspetto la validazione avviene confrontando le aree individuate con quelle ricavate analizzando l'effetto al suolo delle precipitazioni con modellistica afflussi-deflussi (HMS) accoppiata a modelli di propagazione idraulica monodimensionale (nel caso di alveo incassato) e/o bidimensionale (nel caso di alvei in cui non è riconoscibile una direzione di deflusso prevalente).

In particolare tale modello consente la stima delle portate al colmo di piena conoscendo il dato pluviometrico, l'informazione litologica, di uso del suolo, la morfologia di bacino e dei tempi di trasferimento della massa liquida al suo interno. La portata definita in relazione a differenti valori di frequenza di accadimento (o tempi di ritorno) dell'evento meteorico è stata poi inserita come condizione al contorno del modello idraulico di propagazione della piena nel tratto di corso d'acqua analizzato, in modo da valutare l'effetto al suolo degli eventi meteorici con preassegnata frequenza di accadimento ed identificare le principali aree di generazione del deflusso.

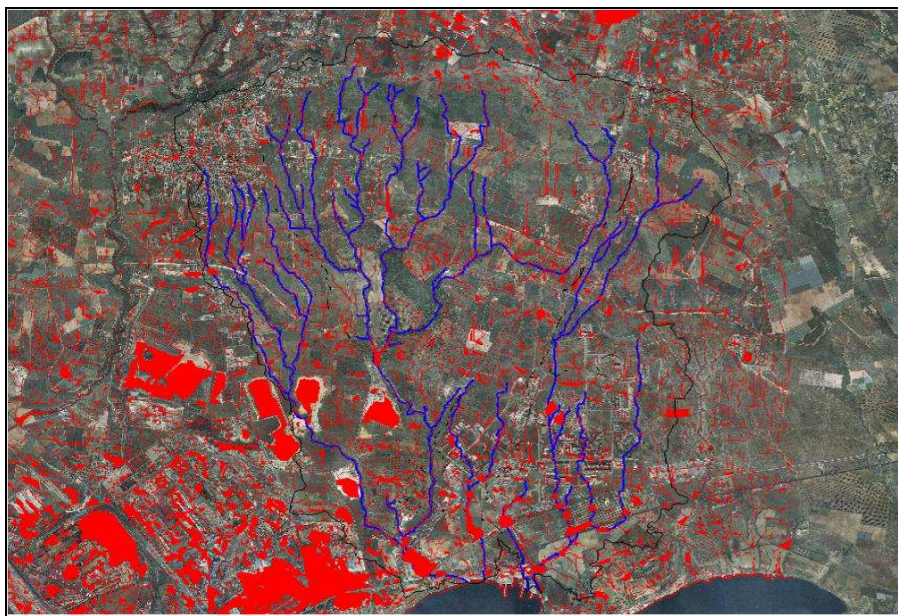


Figura 101

L'area di studio, rappresentata dal bacino idrografico totale (Figura 102), è stata individuata utilizzando le curve di livello estratte dal modello digitale del terreno ricavato dalla Carta Tecnica Regionale presente sul Sistema Informativo Territoriale della Regione Puglia, confrontate con le curve di livello estratte a partire dal rilievo LIDAR. La superficie complessiva ottenuta è stata di 60.2 km², caratterizzata a nord da rilievi collinari con altitudine media attorno a 250 m.s.l.m. mentre a sud è delimitato dalla linea di costa, con quote modeste e prossime al livello del mare.



Figura 102

Al suo interno sono stati individuati 8 sottobacini e l'analisi idrologica è stata condotta per tutte le *sezioni di chiusura*, che individua il punto in cui si viene a raccogliere la portata complessiva del bacino e quindi quella del relativo corso d'acqua (Figura 103).

Le informazioni idrologiche ricavate dall'applicazione della modellistica ai sotto-bacini analizzati hanno consentito di ricavare semplici relazioni empiriche in grado di valutare la risposta idrologica in ogni punto del bacino oggetto di interesse.

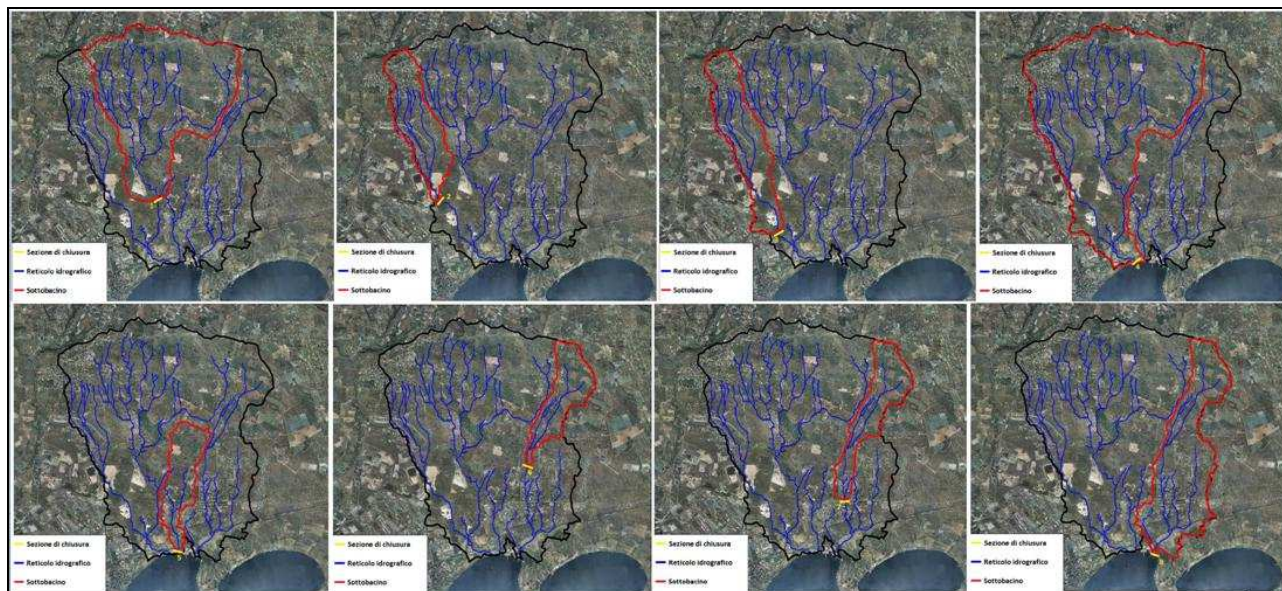


Figura 103

Per quanto riguarda gli aspetti pluviometrici le stazioni che interessano il bacino oggetto di studio sono quelle di Crispiano (a nord del bacino) e di Taranto (a sud del bacino). Per l'analisi pluviometrica sono stati presi in esame ed elaborati i dati delle precipitazioni massime annue per le durate di 5', 10', 15', 1h, 3h, 6h, 12h e 24h, come disponibili dagli annali idrologici pubblicati dal Servizio Idrografico, e definite le curve di probabilità pluviometrica per tempi di ritorno di 50, 100 e 200 anni.

A supporto delle elaborazioni successive e per la definizione degli idrogrammi di piena si è utilizzato un software dedicato (HEC-HMS) che, a partire dalle curve di probabilità pluviometrica, fornisce le portate attese da ciascun sottobacino e per l'intero sistema, individuando entità e momento in cui si osserva il picco di piena.

Una volta ricavati i valori di portata di piena per ciascun sottobacino in corrispondenza dei tempi di ritorno di 50, 100 e 200 anni, per ciascuno di essi sono stati calcolati i coefficienti udometrici, ovvero il contributo di piena per unità di area.

Per valutare la propagazione degli eventi di piena è stato, a sua volta, utilizzato un software specifico per le simulazioni idrauliche (HEC-RAS). Il primo passaggio, relativo alla schematizzazione geometrica dei corsi d'acqua ed alla definizione delle condizioni al contorno (presenza di un moto uniforme a monte ed a valle di ciascun tratto), ha individuato 7 diverse aste del reticolo idrografico suddivise, a loro volta, in 15 tronchi fluviali suscettibili di possibili allagamenti in quanto adiacenti a zone caratterizzate da un valore dell'indice topografico maggiore della soglia prefissata (Figura 104).

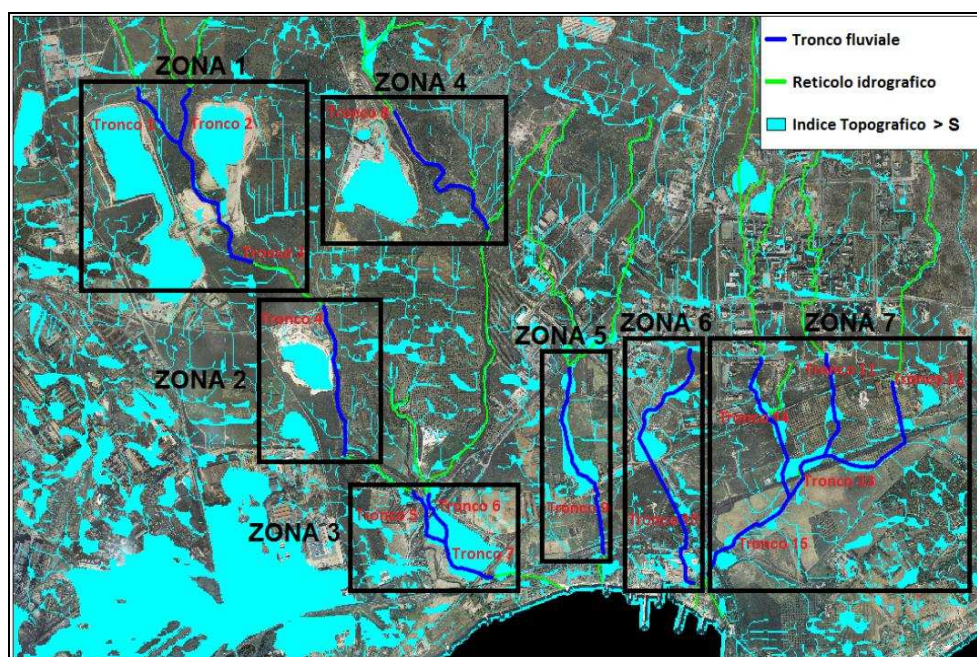


Figura 104

Successivamente sono stati individuate i principali attraversamenti (ponti, strade, condotte) che potessero causare perdita di energia al flusso delle acque (Figura 105 e Figura 106).

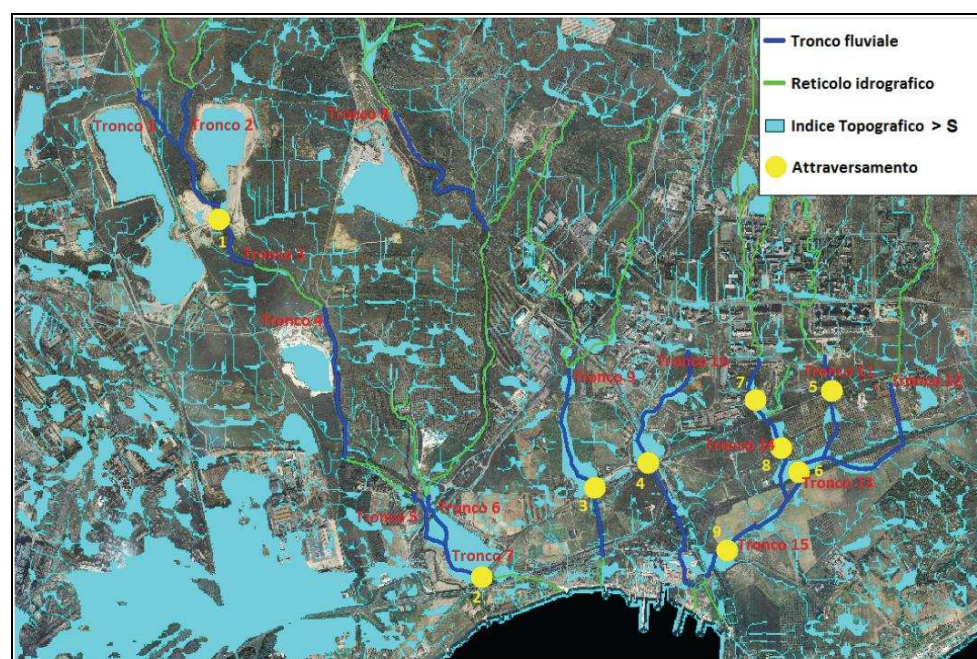


Figura 105. Attraversamenti tronchi fluviali oggetto di analisi.



Figura 106. Esempi di attraversamenti dei tronchi fluviali.

I valori di portata utilizzati in fase di input per ciascun tronco fluviale sono stati ricavati dalle curve coefficienti udometrici - aree definite sull'intera area di studio per tempi di ritorno pari a 50, 100 e 200 anni. In particolare per ogni tronco studiato si è inserita a monte dello stesso la portata idrologica relativa al sottobacino; quindi, per ogni tempo di ritorno prefissato, sono stati ricavati i valori di portata per ciascun tronco fluviale moltiplicando il coefficiente udometrico ottenuto dalle suddette curve per l'area di ciascun sottobacino.

Infine il confronto mediante sovrapposizione dei risultati ottenuti dall'applicazione delle due metodologie di analisi (indice topografico e modello idrologico afflussi-deflussi) ha confermato l'individuazione delle aree propense all'allagamento e, conseguentemente, al deflusso superficiale (Figura 107).

Si evidenzia, infine, come l'indice topografico, qualora mappato utilizzando un valore di soglia è anche un buon indicatore (rozzo ma semplice da valutare) dell'impronta di potenziale allagamento per un evento di piena con tempo di ritorno elevato (200 anni).

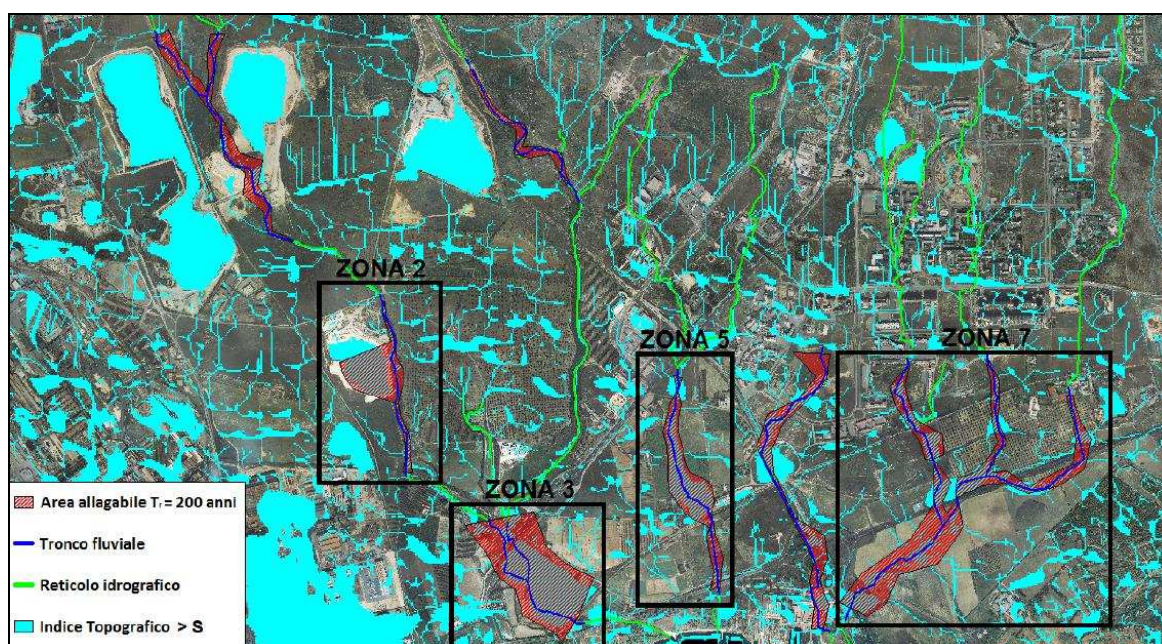


Figura 107. Esempi di attraversamenti dei tronchi fluviali.

4.2.2. Processi di erosione potenziale del substrato

Per definire un modello di simulazione e previsione dei processi idrologici ed erosivi applicato al bacino del Galeso si è utilizzato il *Water Erosion Predicted Project-WEPP* dello *United States Department of Agriculture*, che permette, integrando dati climatici, idrologici, vegetazionali, litologici, di ottenere su scala temporale l'informazione su tre scale spaziali: particellare (*hillslope*), di sottobacino (*watershed*) e di bacino (*grid*). La ricostruzione dell'area oggetto d'analisi è fatta mediante la definizione di zone omogenee in termini di copertura e tipo di suolo (OFE) (Figura 108).

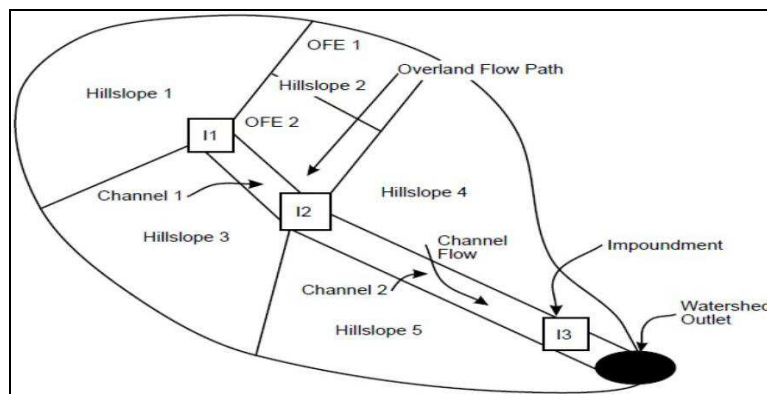


Figura 108. Schematizzazione alla scala watershed.

Il set di parametri climatici è unico per l'intero bacino, mentre la caratterizzazione morfologica, idrologica e d'uso del suolo può variare da zona a zona, ed in corrispondenza di ogni zona; il modello valuta la posizione e la quantità delle particelle solide distaccatesi e depositatesi durante il periodo di simulazione. Il modello fornisce risultati giornalieri su accumulo e perdita di biomassa, evapotraspirazione, redistribuzione dell'umidità all'interno del profilo verticale di suolo, infiltrazione e deflusso superficiale, distacco, deposito e trasporto del sedimento.

Il modello inoltre calcola la perdita di suolo e la produzione di sedimenti al piede del versante considerando sia erosione da flusso laminare (*interrill*) sia per ruscellamento (*rill*).

Una prima analisi qualitativa, condotta a livello conoscitivo preliminare sull'area, ha riguardato lo studio degli indici di vegetazione e più in particolare del *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) e della sua evoluzione temporale. Lo studio si è basato su tre immagini satellitari Landsat 5 acquisite dal sensore Thematic Mapper (TM), nel 1985, 2003 e 2011.

Il confronto tra le immagini NDVI del 1985 e del 2003 conferma l'incremento dell'urbanizzazione già evidenziato in precedenza, con la comparsa, nella porzione posta a sud est del bacino, di pixel marroni e fucsia e la presenza diffusa di cave di estrazione (identificabili con i rettangoli fucsia). Un secondo confronto, effettuato sulle immagini NDVI del 2003 e 2011, conferma la tendenza evolutiva con l'aumento delle aree prive di vegetazione, contrassegnate dal marrone e dal fucsia (Figura 109).

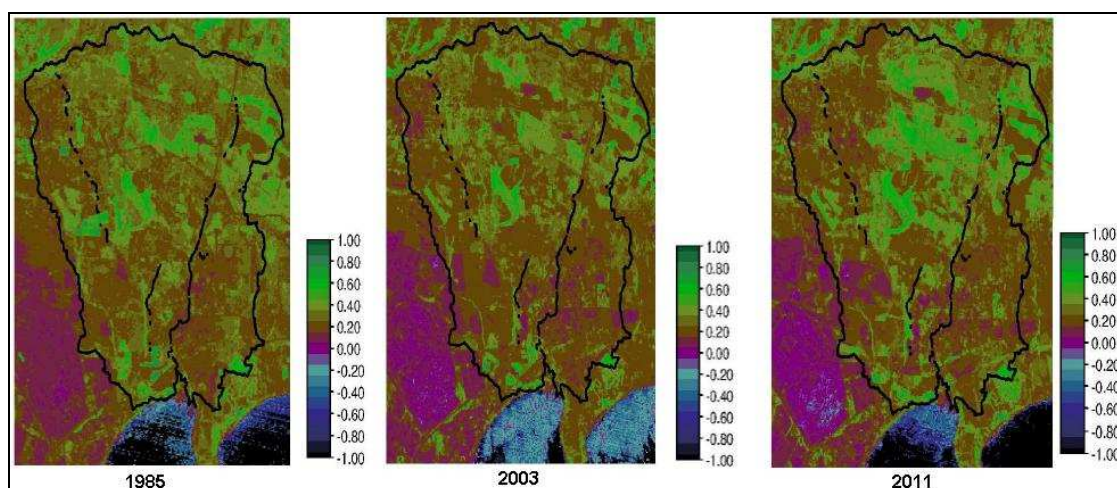


Figura 109. Evoluzione dell'Indicatore NDVI nel 1985, 2003 e 2011 per il bacino del Galeso.

Lo studio ha utilizzato quale base topografica un modello digitale del terreno derivato dal SIT Puglia, mentre con riferimento ai dati climatici, si sono utilizzati i dati della stazione di Ginosa Marina (TA), la più vicina al bacino del Galeso. Per la tipologia di suolo si è fatto riferimento alla carta pedologica della Puglia prodotta nel 2001 (Progetto ACL2, POP – FEOGA realizzato dall'Istituto Agronomico Mediterraneo di Bari - IAMB con il supporto della Facoltà di Agraria dell'Università di Bari).

In merito all'uso del suolo sono state usate più informazioni allo scopo di valutare il ruolo esercitato dallo stesso nella definizione del processo erosivo e, nello specifico, si sono utilizzati i dati del progetto *LaCoast* del 1975, del progetto *Corine Land Cover* 1990 e 1999 e della Carta Tecnica Regionale dell'Uso del Suolo del 2006. Le simulazioni sono state condotte considerando la scala spaziale del sottobacino il quale, nel determinare un profilo rappresentativo ottenuto dalla combinazione dei percorsi di flusso, determina sia la quantità di sedimento che giunge alla sezione di chiusura sia la porzione di bacino/versante maggiormente esposto, quello cioè con la massima propensione a generare sedimento. Le simulazioni sono state condotte al variare del livello di dettaglio spaziale che, posto inizialmente pari a 50 ha, è stato successivamente ridotto a 2 ha, e considerando un uso del suolo dei quattro orizzonti temporali disponibili (1975, 1990, 1999 e 2006).

È stato, pertanto, possibile definire un *tasso di erosione medio atteso al variare della copertura del suolo*, ipotizzando condizioni climatiche ricorrenti (tempo di ritorno 2 anni) al variare dell'uso del suolo, utilizzando quale base minima cartografica sia 50 ha che 2 ha. Si sono riportati in modo qualitativo i risultati ottenuti dalla simulazione che individuano nei grafici, ad essi associati, la produzione di sedimento attesa al variare del versante considerato. I dati evidenziano come, già dal 1975, le zone maggiormente esposte a fenomeni erosivi siano quelle a nord-ovest del bacino e che nel tempo tale propensione sia confermata con un incremento dell'erodibilità potenziale, che comunque interessa anche le aree centrali e a nord est. Considerando l'intero bacino, sempre in riferimento al comportamento medio atteso e al variare dell'uso del suolo, si osserva: un aumento del volume di ruscellamento dal 1975 al 2006; un valore massimo di perdita di suolo sui versanti nel 1999 e una successiva diminuzione nel 2006, comportamento in parte smentito dall'analisi condotta con CSA = 2 ha; un aumento della perdita di suolo nei canali dal 1975 al 2006; una quantità di sedimento che si immette nel Mar Piccolo che presenta un picco nel 1990, una diminuzione nel 1999 e una risalita prossima al valore di picco nel 2006. È stato anche definito un *tasso di erosione medio atteso su un orizzonte temporale pari a 50 e a 100 anni*, nell'ipotesi che l'unità minima areale sia pari a 2 ha e che l'uso del suolo definito dalla mappa 2006 si conservi inalterato fino al termine della simulazione. I risultati, che conservano solo un valore qualitativo, confermano, a fronte di un significativo aumento di produzione del sedimento, quanto già evidenziato dalle precedenti simulazione in merito alla definizione delle aree caratterizzate da maggior criticità (area a nord ovest e successivamente aree centrali ed a sud est). A tal proposito si vedano la Figura 110 e la Tabella 25

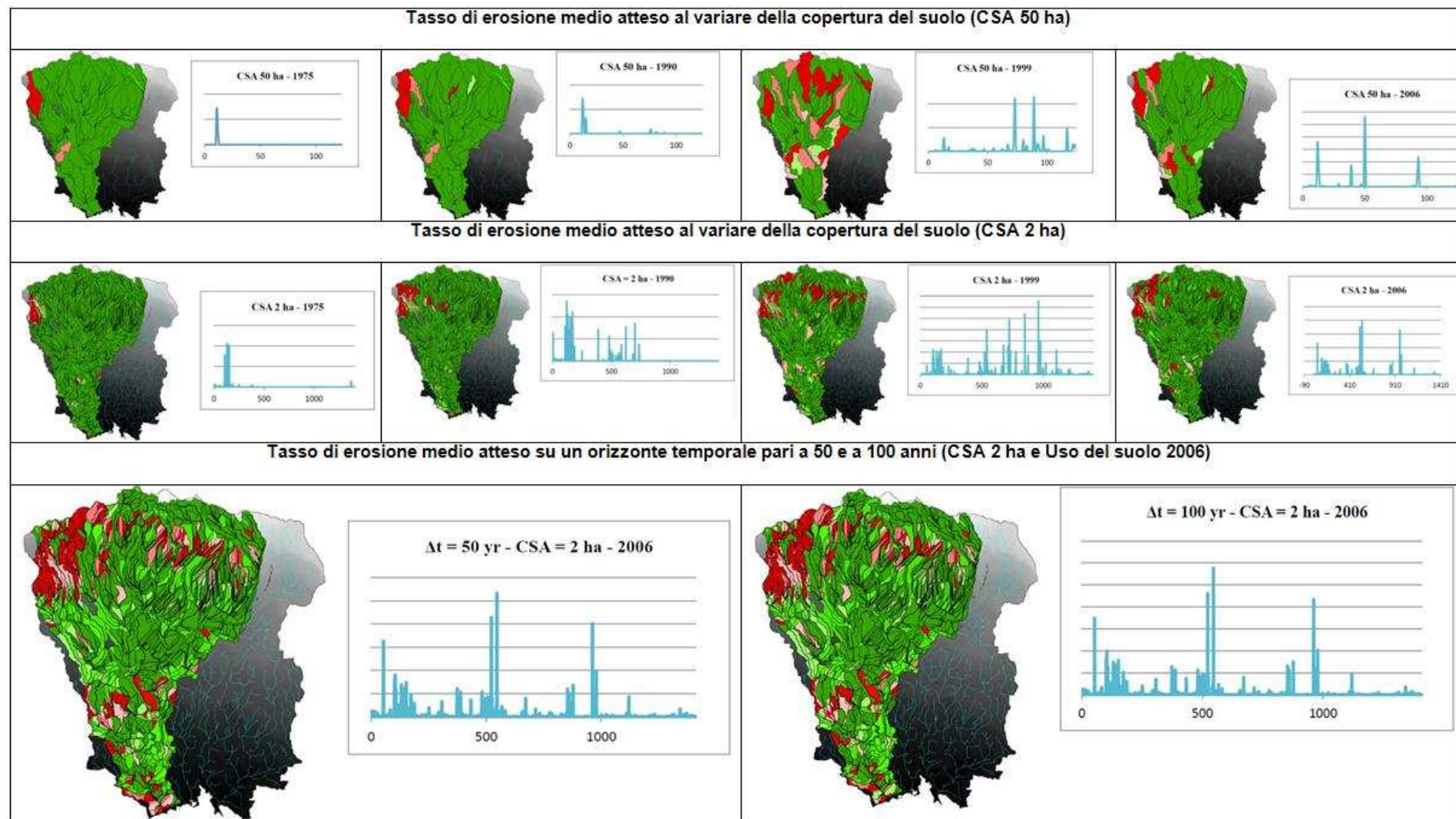


Figura 110. Nei grafici sono riportati in ascissa il numero progressivo dell'OFE ed in ordinata la quantità di materiale mobilitata.

		Dati sul tasso di erosione medio atteso - dettaglio 50ha				Dati sul tasso di erosione medio atteso - dettaglio 2 ha				Dati sul tasso di erosione medio atteso - dettaglio 2 ha – Tempo di simulazione 50 e 100 anni	
		1975	1990	1999	2006	1975	1990	1999	2006	50	100
<i>Rainfall (mm/yr)</i>	Volume annuo di precipitazione	329.70	329.70	329.70	329.70	329.70	329.70	329.70	329.70	349.43	358.87
<i>Runoff through outlet (mm/yr)</i>	Volume annuo di deflusso	1.93	2.77	3.41	4.39	3.26	5.70	6.69	7.64	18.30	18.86
<i>Total contributing area to outlet (ha)</i>	Area contribuyente	3615.45	3615.45	3615.45	3615.45	3536.77	3536.77	3536.77	3536.77	3536.77	3536.77
<i>Precipitation volume in contributing area (m3/yr)</i>	Volume precipitato nell'intero bacino	11,92	11,92	11,92	11,92	11,66	11,66	11,66	11,66	12,36	12,69
<i>Irrigation volume in contributing area (m3/yr)</i>	Volume di irrigazione	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Water discharge from outlet (m3/yr)</i>	Volume di deflusso all'outlet point	69606	100181	123205	158544	115398	201473	236723	270365	647058	667170
<i>Total hillslope soil loss (ton/yr)</i>	Quantità totale di sedimento mobilitato da versante	1677.9	2602.3	8581.8	4365.7	790.3	2248.6	5856.8	4665.8	8397.2	8904.3
<i>Total channel soil loss (ton/yr)</i>	Quantità totale di sedimento mobilitato da canale	479.9	724.2	757.6	996.1	312.8	889.3	1695.2	2387.9	4045959	2311034
<i>Sediment discharge from outlet (ton/yr)</i>	Quantità totale di sedimento in uscita dalla sezione di chiusura del bacino	168.6	390.1	302.4	382.1	76.6	233.6	220.6	203.7	2502356	1424732
<i>Sediment delivery per unit area of watershed (T/ha/yr)</i>	Quantità totale di sedimento in uscita dalla sezione di chiusura del bacino rapportato dall'area del bacino	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	707.5	402.8
<i>Sediment Delivery Ratio for Watershed</i>	Rapporto tra il sediment discharge from outlet e il totale della soil loss (versanti e canali)	0.078	0.117	0.032	0.071	0.069	0.074	0.029	0.029	0.617	0.614
<i>Clay</i>	Materiale eroso: granulometria e materia organica	0.369	0.450	0.362	0.352	0.270	0.291	0.322	0.290	0.407	0.412
<i>Silt</i>		0.537	0.506	0.530	0.521	0.501	0.508	0.519	0.509	0.593	0.588
<i>Sand</i>		0.095	0.044	0.108	0.127	0.230	0.202	0.158	0.201	0.000	0.000
<i>Organic matter</i>		0.108	0.132	0.106	0.103	0.079	0.085	0.095	0.085	0.120	0.121
<i>Index of specific surface of total sediment (m^2/g)</i>	Superficie specifica erosa	131.09	157.93	128.85	125.39	97.64	104.82	115.59	104.66	144.10	145.66
<i>Enrichment ratio of specific surface</i>	Rapporto tra la superficie specifica erosa e quella nel suolo	2.08	2.51	2.04	1.99	1.55	1.66	1.83	1.66	2.29	2.31

Tabella 25. Evoluzione dell'Indicatore NDVI nel 1985, 2003 e 2011 per il bacino del Galeso.

Sulla base dei dati stimati in Tabella 25 si ricava quanto segue.

La quantità di sedimento mobilitato da versante, da canale ed in uscita dalla sezione di chiusura del bacino è rilevante, ed il valore stimato a 50 anni è maggiore di quello stimato a 100 anni. Tale apparente discordanza trova conferma nel fatto che, considerando un orizzonte temporale maggiore (100 anni) aumenta la probabilità che il sedimento accumulato nei canali sia mosso da fenomeni meno intensi ma prolungati. Il valore di *sediment discharge from outlet* essendo definito come media annuale, non è altro che la cumulata dei contributi (solido, liquido, dai canali) diviso per il numero di anni. La presenza di un evento con tempo di ritorno di 50 anni, che mobilita molto materiale, pesa di più di quello maggiore ma non proporzionale avente tempo di ritorno di 100 anni, allorché si divida per una osservazione doppia (si vedano i valori del *sediment delivery ratio*).

Altro aspetto interessante è la tipologia di materiale (granulometria e presenza di materia organica) coinvolto da fenomeni erosivi superficiali che, per la quasi totalità, è associabile a granulometrie argillose e siltose, mentre nella stima ad orizzonte temporale maggiore il contributo della sabbia è irrilevante rispetto a quello delle frazioni inferiori.

Infine, i parametri *index of specific surface* (SSA) e *enrichment ratio of specific surface* (ERSS) esprimono, rispettivamente, la superficie coperta da un materiale per unità di massa ed il rapporto tra SSA del materiale mobilitato e quello del materiale *in situ*. Il valore di SSA serve a determinare il tipo e le proprietà dei materiali coinvolti: maggiore è SSA più fine è il materiale; analogamente, maggiore è ERSS maggiore è la frazione fine che si allontana. Quest'ultimo indice è interessante se lo si associa al fatto che potenzialmente il materiale più fine ha una tendenza maggiore ad associare contaminanti e, quindi, al crescere di questo valore potrebbe crescere la probabilità che il materiale che giunge alla sezione di chiusura del bacino sia contaminato.

4.3. MODELLAZIONE NUMERICA DEL TRASPORTO SOLIDO DEI SEDIMENTI NEL MAR PICCOLO (A CURA DEL POLITECNICO DI BARI)

Una delle attività svolte da parte del gruppo di lavoro del Politecnico di Bari ha riguardato la modellazione numerica del trasporto solido delle particelle di sedimento del Mar Piccolo per effetto delle correnti, così come da modello definito nel Capitolo 2, ed in condizioni indisturbate (in assenza di attività antropiche).

Lo scopo della simulazione eseguita è stato quello di poter individuare le zone in cui la tendenza all'erosione o al deposito è maggiore e, conseguentemente, che mostrano una più o meno una certa propensione al trasporto.

Analogamente alla definizione del modello di circolazione delle masse d'acqua, anche in questo caso è stato impiegato il software MIKE 21-Flow Model, integrato del modulo ST (*Non-cohesive Sediment Transport*), che è un modello morfologico a fondo mobile, che permette di calcolare la capacità di trasporto dei materiali non coesivi (sedimenti) sul fondale generata dalle onde e dalle correnti, oltre a considerare il fondale variabile e, quindi, consentendo una valutazione dell'evoluzione morfologica dello stesso.

Il trasporto solido è stato valutato calcolando separatamente il contributo al trasporto dei sedimenti trascinati sul fondo e di quelli movimentati in sospensione.

Il calcolo è stato svolto considerando le medesime due circolazioni idrodinamiche di base e medie stagionali, rispettivamente invernale ed estiva, che possano ritenersi rappresentative di una situazione realistica.

Si sono imposte come forzanti le condizioni di vento e moto ondoso stagionali ricavati dall'analisi statistica già utilizzata per il modello di circolazione e per le condizioni di marea si è fatto riferimento sia ai valori di marea astronomica, disponibili in un apposito database di cui il software MIKE è provvisto, sia alle serie storiche registrate in situ e disponibili nel database dell'ISPRA Idromare.

In aggiunta, per il modulo del trasporto solido Mike 21 FM ST richiede di specificare il parametro relativo alla dimensione (d_{50}) della particella del materiale di cui si simula il trasporto. In particolare, sulla base delle informazioni e dati disponibili derivati anche dalle indagini di tipo geofisico e geotecnico svolte nell'ambito dello studio generale (vedi Allegato 8), sono state scelte due situazioni ipoteticamente rappresentative dell'area: una prevede un materiale di dimensione media pari a 0.016 mm (Figura 111 e

Figura 112), tipico del limo sabbioso, ed una pari a 0,002 mm (Figura 113 e Figura 114), tipico del materiale argilloso.

In Figura 111 e Figura 112, a scopo esemplificativo, sono riportati i risultati del modello di trasporto solido nelle due condizioni medie considerate, invernale ed estiva, fotografando la situazione in alta e bassa marea. Per un rapido confronto, nelle stesse immagini, questo risultato è stato messo accanto all'indicazione dei flussi prevalenti e semplificati di circolazione delle masse d'acqua, per un livello superficiale ($z=-2\text{m}$) e per quello profondo ($z=-10\text{ m}$).

Come era da attendersi, i sedimenti sono soggetti a movimentazioni lungo i tratti in cui le correnti sono maggiori e prevalenti ed in particolare lungo la costa. Qui si alternano aree a maggior accumulo ad aree a decremento di sedimento. Una situazione di maggior accumulo la si può facilmente individuare in prossimità delle Idrovore dell'ILVA.

Nella Figura 113 e Figura 114 sono invece rappresentate le simulazioni del modello di trasporto solido ipotizzando un materiale sedimentario rappresentato da argille (ipotesi $d_{50}=0.002\text{ mm}$). Anche in questo caso sono riportate accanto alle simulazioni invernale ed estiva, anche i rispettivi flussi principali di circolazione delle masse d'acqua. Diminuendo la dimensione del materiale trasportato, conseguentemente aumentano e si estendono le aree in cui la movimentazione crea accumulo/decremento di sedimenti. In particolare si accentuano gli effetti di escavo prodotto dalla circolazione delle acque lungo la costa e di accumulo verso il centro.

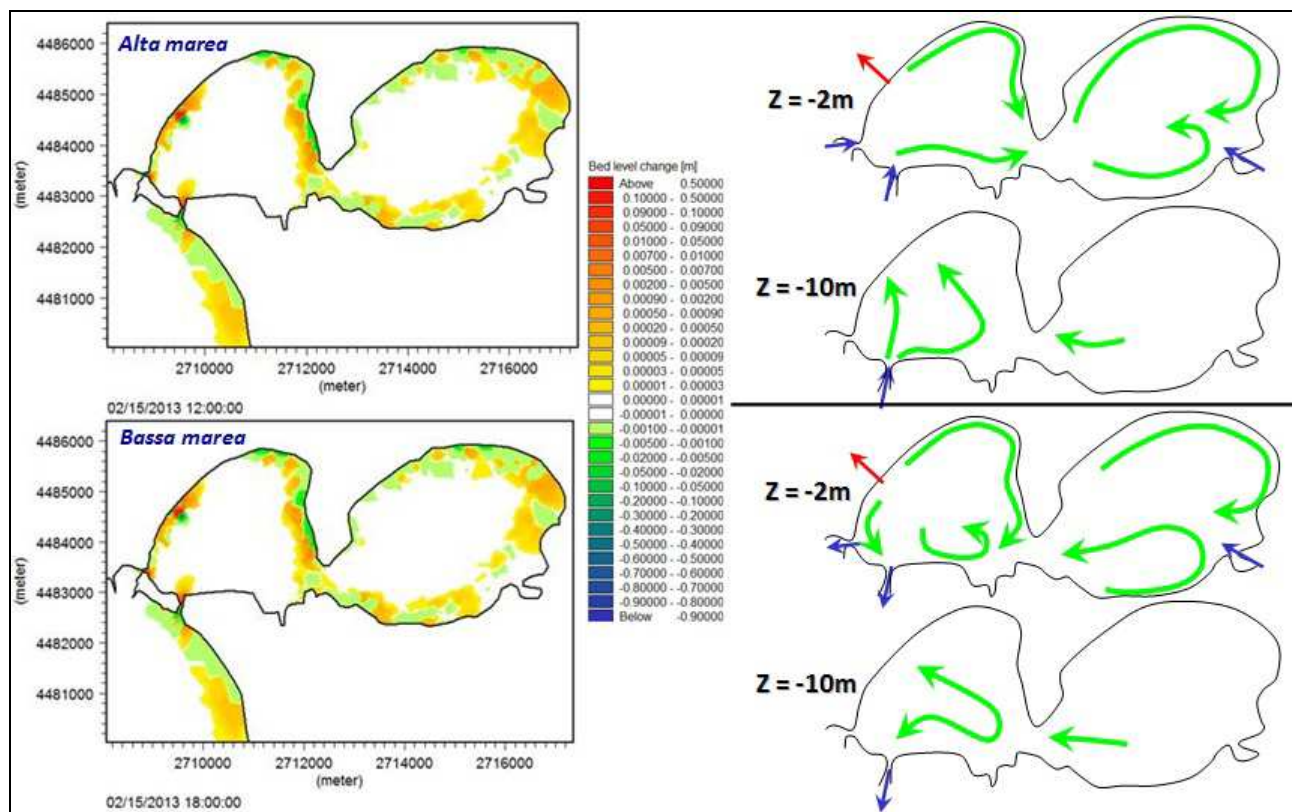


Figura 111. Simulazione invernale: 15° giorno, in condizione di alta e bassa marea, $d_{50} = 0.016$ mm (limo sabbioso).

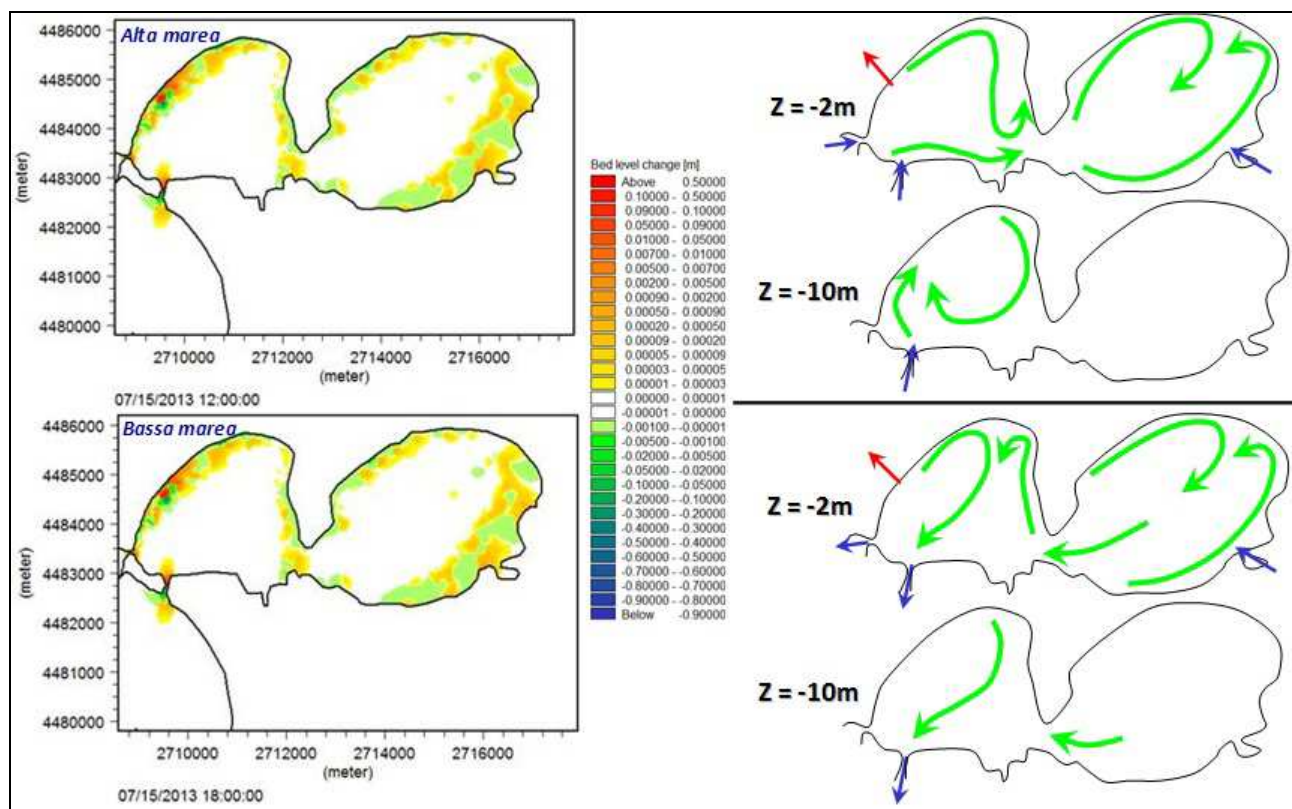


Figura 112. Simulazione estiva: 15° giorno, in condizione di alta e bassa marea, $d_{50} = 0.016$ mm (limo sabbioso).

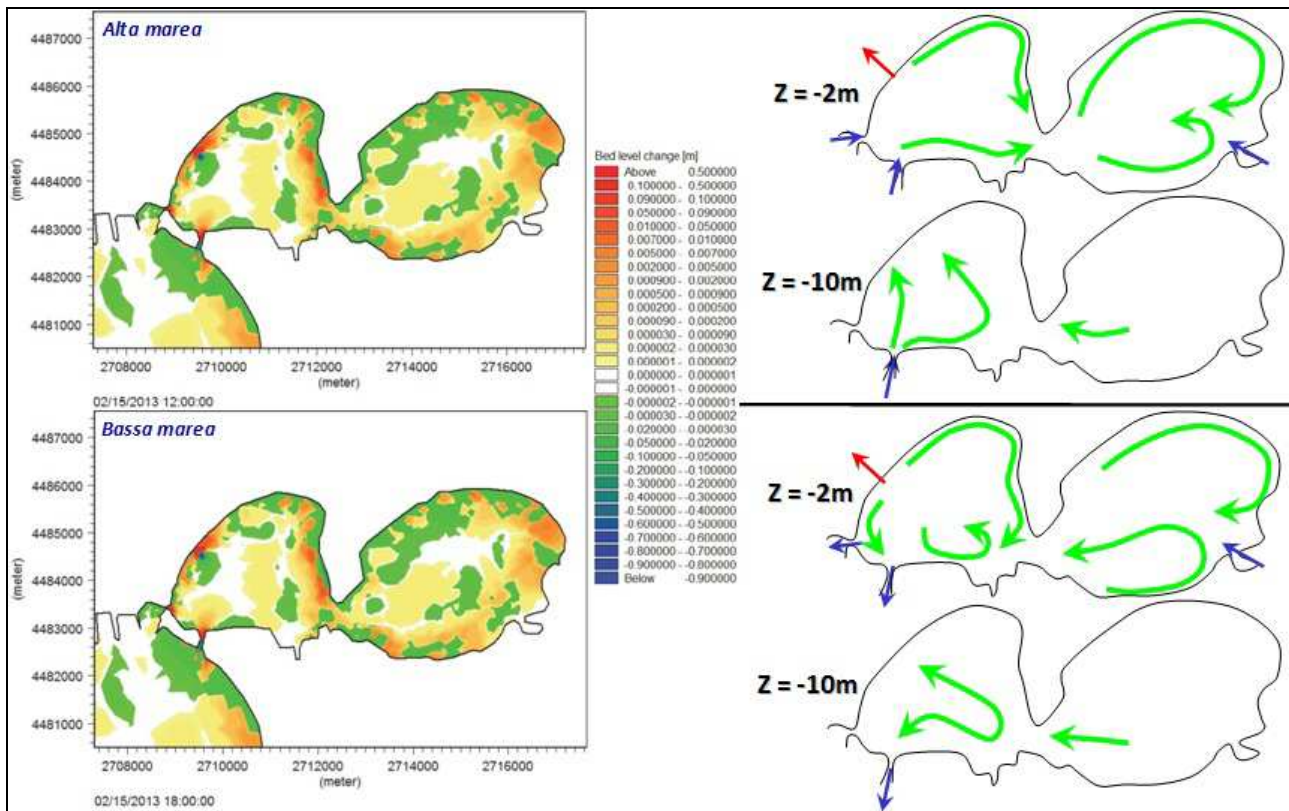


Figura 113. Simulazione invernale: 15° giorno, in condizione di alta e bassa marea, $d_{50} = 0.002$ mm (argilla).

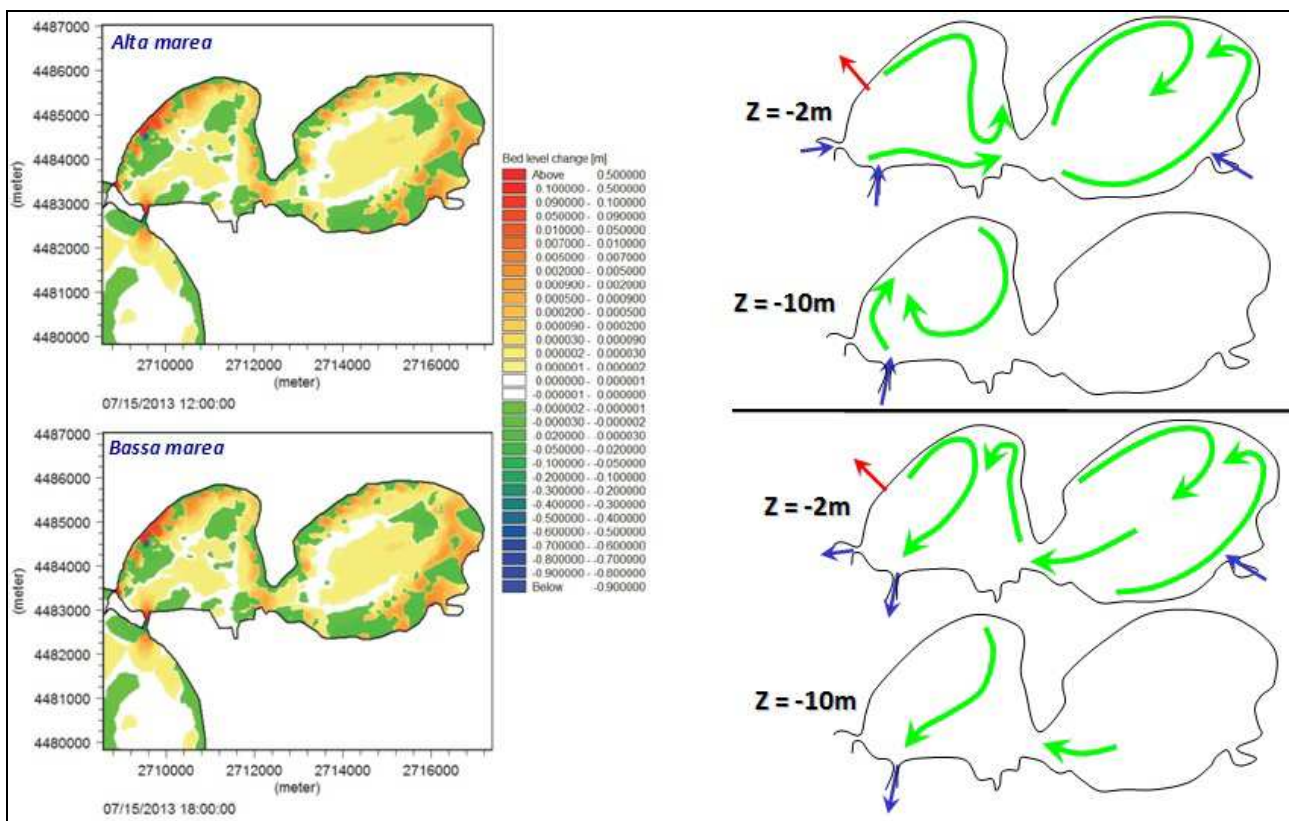


Figura 114. Simulazione estiva: 15° giorno, in condizione di alta e bassa marea, $d_{50} = 0.002$ mm (argilla).

5. BERSAGLI

Sulla base dei dati e delle informazioni pregresse già disponibili sull'area del SIN, era emerso negli anni passati come gli organismi bivalvi (*M. galloprovincialis*) allevati all'interno del 1° seno del Mar Piccolo avessero mostrato concentrazioni critiche di inquinanti organici (quali ad esempio PCB). Questa criticità, ritenuta di una importanza tale da rendere indispensabile la costituzione, nel 2010-2011, di uno specifico Tavolo Tecnico Regionale, ha comportato l'obbligatoria emissione di apposite ordinanze di divieto di allevamento, raccolta e commercializzazione del prodotto finito proveniente da queste zone (Figura 115 e Figura 116).

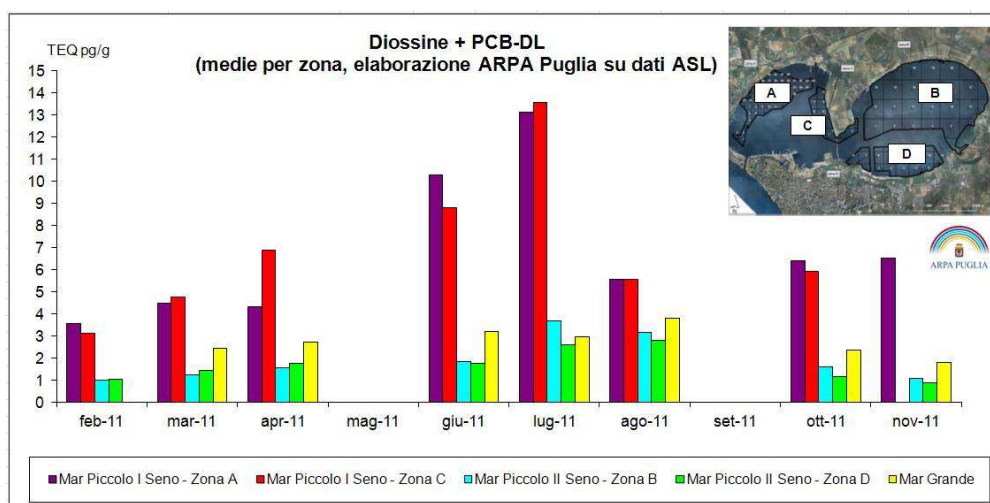
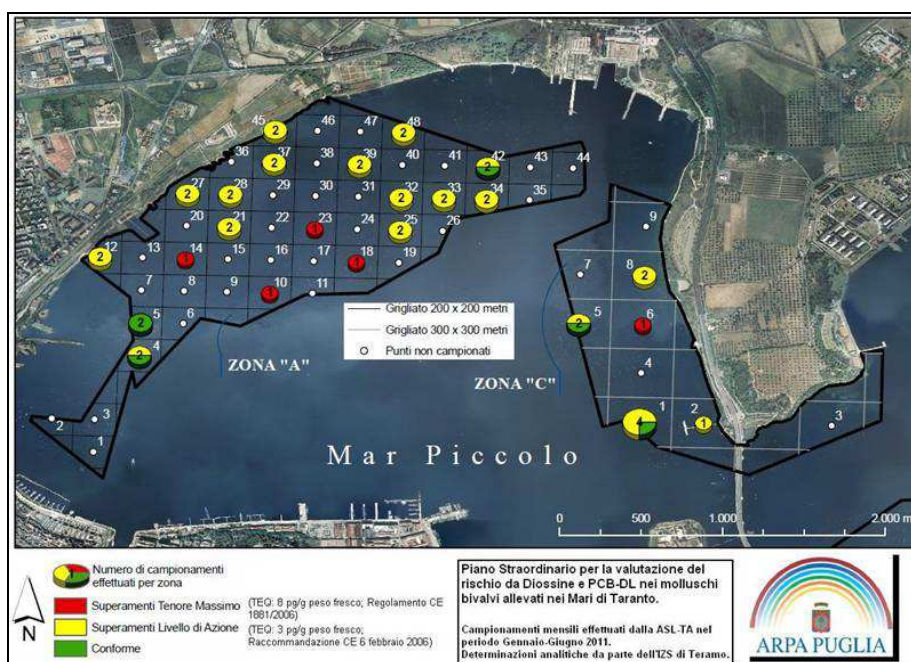


Figura 116. Evidenza di un maggiore bioaccumulo nei mesi estivi (situazione ripetutasi anche negli anni successivi).

5.1. VALUTAZIONE DELLA BIODISPONIBILITÀ E RILASCIO DEI CONTAMINANTI DA SEDIMENTI (A CURA DEL CNR IAMC DI TARANTO)

Le attività di studio condotte dal gruppo di lavoro del CNR IAMC di Taranto in attuazione della Convenzione con ARPA Puglia hanno riguardato la valutazione del potenziale rilascio di contaminanti (metalli e PCB) all'interfaccia sedimento/acqua, programmando esperimenti di "risospensione simulata" e di conseguente bioaccumulo mediante l'impiego di molluschi bivalvi.

Le prove di bioaccumulo sono state condotte sia *ex situ* (in laboratorio) sia *in situ*, in corrispondenza di un'area contaminata presente nel primo seno del Mar Piccolo (Area 170 ha), dove è stato allestito un esperimento di *mussel watch*, con risospensione periodica dei sedimenti (Figura 117).



Figura 117

Per le prove di bioaccumulo, sia *in situ* ed *ex situ*, sono stati utilizzati mitili non contaminati provenienti dall'area di Cagnano-Varano (Fg) e stabulati presso gli impianti della Mitilittica (Bisceglie). Questi mitili sono stati analizzati al fine di valutare le concentrazioni di metalli e PCB.

Analogamente, da una boa ancorata sul fondo nei pressi della stazione 1 sono stati prelevati, a una profondità di circa 4 metri dal fondo, molluschi bivalvi (*Mytilus galloprovincialis*) provenienti da una popolazione nativa, al fine di ottenere informazioni circa i livelli caratteristici degli inquinanti oggetto di studio in organismi "naturalmente" presenti nell'area test.

Sia i mitili nativi sia i trapiantati avevano una taglia media compresa tra 6.0 e 7.5 cm.

Per l'esecuzione del test di bioaccumulo *ex situ*, in data 22 maggio 2013, è stato riempito un acquario con 280 L litri di acqua di mare e 30 kg di sedimento marino, prelevati in corrispondenza della stazione 1. L'acquario è stato collocato in una stanza termostata al fine di mantenere costante la temperatura (24-25°C). Dopo circa 48 ore, quando tutto il sedimento si è depositato sul fondo, sono stati messi in funzione degli aeratori, al fine di garantire una adeguata ossigenazione dell'acqua. Previa stabulazione di 10 giorni, i mitili, in numero di 150 individui e suddivisi in differenti pool con apposite retine, sono stati sospesi nell'acquario, mediante una griglia (Figura 118).

I mitili sono stati posti ad una altezza pari a circa 70-80 cm dal sedimento e prelevati (30 individui ad ogni prelievo) in corrispondenza del tempo T0, T15, T30 e T45 ovvero del 1°, 15°, 30° e 45° giorno di esperimento. Ogni 7 giorni, nell'acquario sono stati provocati manualmente eventi di risospensione del sedimento. Nell'intero periodo dei 45 giorni i mitili sono stati alimentati con opportuni mangimi per organismi filtratori. E' opportuno specificare che i molluschi impiegati nell'allestimento delle prove di bioaccumulo non erano in fase di emissione dei gameti.



Figura 118. Esperimento di bioaccumulo ex situ.

Per il test *in situ*, in data 22 maggio 2013 mitili della stessa provenienza di quelli utilizzati per il test *ex situ* sono stati impiantati da un subacqueo ad un gavitello, legato al corpo morto della boa posizionata nella stazione 1 (Figura 119). Anche in questo caso i mitili sono stati suddivisi in retine da 30 individui ciascuna, posizionate ad una distanza dal fondo di circa 4 metri. I prelievi di mitili (30 individui ad ogni prelievo), sono stati effettuati in corrispondenza del T0, T15, T30 e T45 ovvero del 1°, 15°, 30° e 45° giorno di esperimento. Ogni 7 giorni, sono stati provocati eventi di risospensione del sedimento grazie all'intervento di subacquei, rendendo l'acqua della zona di impianto completamente torbida.



Figura 119. Esperimento di bioaccumulo in situ.

Evidenze analitiche del bioaccumulo nei mitili (*M. galloprovincialis*) per i metalli ed i PCB

I risultati delle concentrazioni dei metalli relativi alle prove di bioaccumulo, sia per gli esperimenti in situ sia per gli ex situ, nonché le concentrazioni determinate nei mitili naturali, prelevati direttamente dalla stazione 1, sono riportate nella Tabella 26 e nella Tabella 27, rispettivamente per gli esperimenti *in situ* ed *ex situ*.

Esperimento in situ	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Ni	Zn	Pb	Al	Mn	Sn	V	Se	Hg
mg/Kg p.u.														
T= 0	1.86	0.07	0.26	1.42	25.91	0.20	4.64	0.10	13.50	0.69	0.01	0.11	0.69	0.003
T= 15 gg	2.14	0.06	0.38	1.31	41.50	0.26	6.53	0.29	14.88	0.97	0.02	0.29	0.85	0.008
T= 30 gg	2.25	0.09	0.72	3.27	47.21	0.31	13.29	0.34	16.18	1.69	0.03	0.31	0.97	0.030
T= 45 gg	2.73	0.06	1.04	2.89	50.26	0.34	17.16	0.43	16.07	2.53	0.03	0.38	0.98	0.036
Mitili Naturali	3.01	0.07	0.45	2.24	48.74	0.37	15.98	0.34	29.93	1.50	0.07	0.26	0.75	0.04

Tabella 26. Concentrazione dei metalli riscontrata nei mitili trapiantati, posizionati nei pressi della stazione 1 ed analizzati nel corso dell'esperimento (T=0, T=15, T=30, T=45), e nei mitili naturali prelevati direttamente nella stazione 1.

Esperimento ex situ	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Ni	Zn	Pb	Al	Mn	Sn	V	Se	Hg
mg/Kg p.u.														
T= 0	1.86	0.07	0.26	1.42	25.91	0.20	4.64	0.10	13.50	0.69	0.01	0.11	0.69	0.003
T= 15 gg	1.73	0.08	0.28	1.04	33.46	0.40	7.71	0.32	14.15	0.80	0.05	0.13	0.82	0.037
T= 30 gg	1.92	0.08	0.38	1.86	40.20	0.57	12.03	0.37	14.89	0.81	0.04	0.25	0.66	0.060
T= 45 gg	2.29	0.07	0.82	2.06	41.84	0.62	18.22	0.44	15.77	1.12	0.06	0.34	0.71	0.064

Tabella 27. Concentrazione dei metalli riscontrata nei mitili trapiantati e posizionati nella vasca in laboratorio, analizzati nel corso dell'esperimento (T=0, T=15, T=30, T=45).

Nei mitili naturali della stazione 1 (nativi), le concentrazioni dei metalli sono paragonabili a siti contaminati; i livelli di Pb, Cd e Hg sono comunque risultati inferiori ai limiti di legge (limiti previsti dal regolamento CE n. 1881/2006: Cd 1.0 mg/Kg p.u., Pb 1.5 mg/Kg p.u. e Hg 0.5 mg/Kg p.u.).

Le concentrazioni dei metalli nei mitili trapiantati, sia nell'esperimento *in situ* che *ex situ*, sono incrementate nel tempo: nei mitili *in situ* l'accumulo dell'As, Cr, Fe, Mn e V è stato più alto rispetto a quello dell'esperimento *ex situ*; nei mitili *ex situ* l'accumulo del Ni, Sn e Hg è stato più elevato rispetto a quelli *in situ*. Tale risultato è verosimilmente imputabile al fatto che eventi di movimentazione dei sedimenti possono modificarne le condizioni redox (equilibrio dei solfuri e composti organici) e causare un rilascio dei metalli nella colonna d'acqua.

Per quanto riguarda i PCB è emerso come le concentrazioni iniziali nei mitili trapiantati (a T = 0) siano risultate (2 ng/g p.u.) simili ad aree scarsamente antropizzate ed inferiori ai limiti previsti dalla normativa di riferimento. Invece i valori di PCB determinati nei mitili naturali (nativi) hanno mostrato un livello di contaminazione elevato con concentrazioni (129 ng/g p.u.) al di sopra dei limiti imposti dalla norma (Regolamento CE n. 1259/2011: Sommatoria PCB congeneri 28, 52, 101,153, 138, 180 = 75 ng/g p.u.).

Dopo 15 giorni (T = 15) i mitili trapiantati presentano un incremento notevole del livello di PCB: nell'esperimento *in situ* l'accumulo è stato il 58% della concentrazione finale (a T = 45) mentre nell'esperimento *ex situ* è stato del 20%. Durante il periodo di esposizione (T = 30 e T = 45) questa capacità di bioaccumulo è andata via via riducendosi in termini percentuali. Alla fine dell'esperimento *in situ* ed *ex situ* (T = 45) i livelli dei PCB nei mitili trapiantati sono risultati poco al di sotto di quelli determinati nei mitili naturali (nativi), non raggiungendo quindi il plateau di concentrazione. Alla fine dell'esperimento (T = 45) la quantità totale di PCB bioaccumulata dai mitili *in situ* rispetto a quelli *ex situ* è risultata differente. Questa diversa capacità di accumulo può dipendere da fattori quali: la disponibilità di cibo, tassi di filtrazione e metabolismo differenti, differenze nei processi di risospensione dei sedimenti, ecc. I mitili trapiantati *in*

situ, alla fine dell'esperimento (T = 45) hanno raggiunto, per i così detti "PCB target" (Σ PCB 28, 52, 101, 153, 138 e 180), una concentrazione superiore (del 30% circa) ai tenori massimi imposti dal Regolamento CE n. 1259/2011. Dopo 15 giorni (T = 15) era stato bioaccumulato un valore di PCB target pari all'80% circa del limite previsto dalla stessa norma, e dopo 30 giorni (T = 30) l'85% circa.

Il profilo dei congeneri dei PCB appare confrontabile anche con quello del sedimento utilizzato nelle prove di bioaccumulo, evidenziando che i mitili e le particelle di sedimento accumulano o adsorbono i PCB in modo simile. La notevole presenza dei penta, esa ed eptacloro cloro-sostituiti (es PCB153 e PCB138) nell'ambiente e nel biota è legata alle caratteristiche commerciali dei prodotti che li contengono (sono le più diffuse, come ad es. per AROCLOR 1260 e 1254) ed alla struttura chimica che li rende lipofilici e stabili. In Tabella 28 e Tabella 29 sono riportati i valori di concentrazione dei PCB (sommatoria e singoli congeneri), rispettivamente per l'esperimento *in situ* (stazione 1) ed *ex situ* (in laboratorio).

PCB ng/g peso umido	T=0	T=15	T=30	T=45	Naturali
18	ND	0.2	0.2	0.2	0.2
31	0.1	0.6	0.7	0.6	0.6
28	0.1	0.7	0.7	0.8	0.7
52	0.2	4.9	4.7	8.1	5.1
44	0.1	1.0	1.0	1.3	0.9
95	0.2	6.1	6.8	10.5	10.1
101	0.5	9.4	11.7	18.2	19.1
99	0.2	9.4	12.7	20.1	22.3
110	0.2	7.3	9.5	14.4	15.2
151	0.1	4.4	4.6	5.9	8.1
123	ND	0.2	0.3	0.4	0.5
149	0.3	12.5	15.0	22.6	29.7
118	0.2	7.7	11.1	16.9	20.3
114	ND	0.1	0.1	0.2	0.1
146	0.1	3.8	5.6	8.6	12.4
153	0.7	23.5	28.6	46.2	66.8
105	0.1	1.4	1.5	1.9	1.7
138	0.5	14.0	14.8	21.9	31.7
187	0.2	9.4	11.8	18.2	28.6
183	0.1	1.8	2.3	3.6	5.8
128	0.1	1.7	2.4	3.4	5.0
167	0.1	0.5	0.8	1.2	1.9
177	0.1	2.1	2.4	3.4	5.7
156	ND	0.6	0.8	1.0	1.4
157	ND	0.3	0.3	0.5	0.7
180	0.1	4.5	3.1	3.3	5.5
170	ND	1.2	0.8	0.9	1.5
189	ND	0.1	0.2	0.2	0.2
PCB Σ28	4.1	129.6	154.3	234.4	301.8

Tabella 28. Concentrazione dei PCB (sommatoria e singoli congeneri), rispettivamente per l'esperimento *in situ* (stazione 1).

PCB ng/g peso umido	T=0	T=15	T=30	T=45
18	ND	0.1	ND	0.5
31	0.1	0.3	0.3	1.8
28	0.1	0.6	0.3	2.0
52	0.2	2.5	3.0	11.3
44	0.1	0.8	0.9	3.5
95	0.2	2.9	4.8	14.0
101	0.5	2.4	4.4	11.7
99	0.2	2.4	4.8	12.6
110	0.2	2.1	5.4	14.6
151	0.1	1.2	1.7	5.3
123	ND	0.1	0.1	0.3
149	0.3	2.8	6.1	16.2
118	0.2	1.9	4.0	10.5
114	ND	ND	ND	0.0
146	0.1	0.9	1.8	4.4
153	0.7	4.9	8.6	22.4
105	0.1	0.4	0.5	1.4
138	0.5	3.6	5.0	14.3
187	0.2	2.0	3.6	9.2
183	0.1	0.4	0.8	2.2
128	0.1	0.5	1.0	2.5
167	0.1	0.1	0.3	0.6
177	0.1	0.6	0.9	2.5
156	ND	0.1	0.3	0.8
157	ND	0.1	0.2	0.3
180	0.1	0.8	1.4	4.0
170	ND	0.3	0.4	1.1
189	ND	ND	0.1	0.1
PCB Σ28	4.1	34.8	60.5	170.2

Tabella 29. Concentrazione dei PCB (sommatoria e singoli congeneri), rispettivamente per l'esperimento *ex situ*.

Complessivamente le prove di bioaccumulo (*in situ* ed *ex situ*) hanno dunque evidenziato, per i metalli, un incremento più o meno significativo: Hg (600% esperimento *in situ* – 1350% esperimento *ex situ*), Sn (175% esperimento *in situ* - 525% esperimento *ex situ*), Pb (268% esperimento *in situ* – 323% esperimento *ex situ*), Cr (240% esperimento *in situ* – 201% esperimento *ex situ*), Zn (208 esperimento *in situ* – 268% esperimento *ex situ*), V (187% esperimento *in situ* e *ex situ*). Il valore del bioaccumulo non ha comunque superato i limiti imposti dal Regolamento CE 1881/2006 per il Pb, Cd e Hg. Per i metalli si può ipotizzare l'innescio di processi di detossificazione specie-specifici che ne limitano l'accumulo nell'organismo (in questo caso per la specie *Mytilus galloprovincialis*).

Al contrario, il trend di bioaccumulo dei PCB nei mitili dell'esperimento *in situ* ha evidenziato un raggiungimento dei limiti imposti dalla norma di riferimento intorno al 30° giorno di esposizione (T=30), con il superamento al 45° giorno (T=45); tale andamento fa supporre il raggiungimento delle alte concentrazioni riscontrate nei mitili nativi (nel caso specifico quelli prelevati direttamente dalla stazione 1) in periodi relativamente brevi, ma comunque superiori a 45 giorni.

5.1.1. Aspetti inerenti la decontaminazione da PCB e metalli nei mitili del Mar Piccolo

Nell'ambito della Convenzione siglata tra ARPA Puglia ed il CNR IAMC di Taranto, è stata definita anche un'attività integrativa inerente lo "Studio delle dinamiche di decontaminazione dei mitili in relazione al bioaccumulo a carico di policlorobifenili ed alcuni metalli rappresentativi della contaminazione riscontrata nel Mar Piccolo di Taranto, attraverso la loro stabulazione sia in vasca che in aree marine idonee all'allevamento", finalizzata a valutare le variazioni delle concentrazioni di PCB e metalli in mitili prelevati in

un'area contaminata del 1° seno (Area 170 ha) in seguito ad una fase di stabulazione realizzata sia in una vasca controllata, che in un'area del Mar Grande destinata ai nuovi insediamenti di mitilicoltura (Figura 120). L'esperimento ha avuto la durata di 60 giorni e i campioni sono stati prelevati e analizzati ogni 15 giorni.



Figura 120

Il campionamento dei molluschi bivalvi nativi è stato effettuato a settembre 2013 in corrispondenza della Stazione 1, prelevando individui di taglia media di 5.0-6.0 cm.

Per l'esecuzione delle prove in laboratorio, i mitili, in numero di 300 individui, suddivisi in differenti pool con apposite retine da 50 individui ciascuno, sono stati posti in una vasca per acquacoltura, riempita con acqua di mare cambiata periodicamente. Nella vasca è stato posto un sensore per la registrazione giornaliera dei valori di temperatura. Il prelievo dei mitili (30 individui per ogni prelievo) è stato effettuato in corrispondenza del tempo T0, T15, T30, T45 e T60 (corrispondente al 1°, 15°, 30° e 45° e 60° giorno di esperimento). Per l'esecuzione delle prove in mare, i mitili (in numero pari a 300 individui), suddivisi in differenti pool con apposite retine da 50 individui ciascuno, sono stati posti in ceste da acquacoltura in corrispondenza di un impianto di allevamento di mitili localizzato in Mar Grande (Figura 120). In corrispondenza di questo sito sono stati prelevati anche dei campioni di sedimento superficiale ed effettuate misure di parametri chimico-fisici (sonda multiparametrica e prelievo di campioni d'acqua).

Le analisi nei campioni di mitili hanno riguardato la determinazione dei metalli (Alluminio, Arsenico, Cadmio, Cromo, Rame, Ferro, Mercurio, Manganese, Nichel, Piombo, Selenio, Stagno, Vanadio, Zinco) e dei PCB (congeneri 18, 28, 31, 44, 52, 95, 99, 101, 105, 110, 114, 118, 123, 128, 138, 149, 146, 151, 153, 156, 157, 167, 170, 177, 180, 183, 187, 189). Durante la fase di stabulazione, al tempo (giorni) T=0, T=30 e T=60, sono stati prelevati individui al fine di determinare anche l'Indice di Condizione (g/ml) come indicatore dello stato fisiologico dei mitili (dipendente dalla dimensione, dalla stagione, dalle condizioni ambientali, dallo stato riproduttivo, dalla disponibilità di cibo e dal grado di esposizione all'aria) e che fornisce un dato sulla quantità di "polpa" contenuta in un centimetro cubo di spazio intervalvare. In merito allo specifico

indicatore, nel corso degli esperimenti in Mar Grande si è assistito ad una lieve diminuzione del contenuto lipidico, del contenuto di sostanza organica e ad un aumento del contenuto di acqua.

Per quanto attiene i parametri di contaminazione, durante il periodo di stabulazione le concentrazioni dei metalli sia nei mitili trasferiti in Mar Grande che in laboratorio non hanno subito nel tempo significativa diminuzione (Tabella 30).

I PCB totali in entrambi gli esperimenti hanno invece presentato, al termine del periodo di sperimentazione, un decremento significativo. Dopo i primi 15 giorni, i bivalvi di Mar Grande hanno mostrato una diminuzione del livello di PCB pari al 53%, diversamente da quelli mantenuti in laboratorio, in cui la perdita è stata solo del 7%. Al termine dei 60 giorni, le concentrazioni sono passate rispettivamente da 307.4 a 108.0 ng/g p.u. e da 307.4 a 147.8 ng/g p.u. con un decremento finale pari circa al 65% per i mitili stabulati in Mar Grande e al 52% per quelli mantenuti in laboratorio. In Mar Grande, i livelli dei PCB nei mitili scendono al di sotto dei livelli massimi imposti dal Regolamento CE, pari a 75 ng/g p.u. (concentrazione riferita alla somma dei PCB target 28, 52, 101, 138, 153 e 180), nei tempi tra T=15 e T=30, mentre in laboratorio (vasca in condizioni controllate) i PCB raggiungono nei bivalvi concentrazioni inferiori ai limiti, solo dopo 45 giorni (Tabella 31).

	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Ni	Zn	Pb	Al	Mn	Sn	V	Se	Hg
	mg/Kg p.u.													
Mar Grande T= 0	3.66	0.08	0.51	3.54	20.07	0.37	28.04	0.36	28.61	1.96	0.03	0.29	0.29	0.035
Mar Grande T= 15 gg	7.69	0.10	0.51	3.35	29.05	0.57	24.64	0.34	52.41	2.57	0.08	0.47	0.47	0.026
Mar Grande T= 30 gg	8.02	0.09	0.60	1.94	21.35	0.31	25.03	0.29	26.33	2.06	0.03	0.50	0.50	0.032
Mar Grande T= 45 gg	7.49	0.08	0.66	2.34	25.02	0.30	22.29	0.33	36.44	2.59	0.05	1.15	1.15	0.033
Mar Grande T= 60 gg	4.25	0.10	0.66	2.71	47.13	0.55	26.39	0.41	96.95	2.45	0.04	0.60	0.60	0.026
Laboratorio T= 0	3.42	0.07	0.48	3.30	18.74	0.35	26.19	0.36	28.61	1.83	0.03	0.27	0.29	0.035
Laboratorio T= 15 gg	4.04	0.11	0.75	5.41	19.35	0.89	34.78	0.45	13.84	1.61	0.04	0.28	0.28	0.030
Laboratorio T= 30 gg	3.43	0.09	0.52	2.93	14.39	0.20	29.29	0.45	7.36	1.70	0.03	0.23	0.23	0.026
Laboratorio T= 45 gg	2.99	0.09	0.57	4.91	29.41	0.48	29.03	0.56	36.27	2.22	0.17	0.30	0.30	0.027
Laboratorio T= 60 gg	3.16	0.10	0.72	5.10	15.38	0.36	27.11	0.54	10.03	1.44	0.10	0.24	0.24	0.032

Tabella 30

Mar Grande						In laboratorio					
PCB ng/g p.u.	T=0	T=15	T=30	T=45	T=60	PCB ng/g p.u.	T=0	T=15	T=30	T=45	T=60
18	0.1	0.1	0.1	0.1	ND	18	0.1	0.1	0.1	ND	ND
31	0.6	ND	0.1	ND	ND	31	0.6	0.1	0.1	ND	ND
28	0.8	0.1	0.1	0.1	ND	28	0.8	0.1	0.1	0.1	ND
52	3.3	1.4	1.0	0.9	0.5	52	3.3	2.6	1.6	1.4	1.4
44	0.6	0.3	0.2	0.2	0.2	44	0.6	0.7	0.4	0.3	0.0
95	11.5	4.3	4.1	3.1	2.5	95	11.5	8.4	5.9	3.9	0.3
101	20.8	8.5	9.1	6.3	5.4	101	20.8	16.4	13.4	7.7	4.2
99	19.2	8.5	8.9	6.2	5.9	99	19.2	17.1	12.6	7.9	9.0
110	19.3	8.7	8.1	6.5	5.5	110	19.3	17.0	13.9	8.2	8.9
151	6.0	2.7	3.0	2.2	1.8	151	6.0	5.2	3.9	2.4	2.8
123	0.5	0.3	0.4	0.3	ND	123	0.5	0.3	0.3	0.3	0.2
149	19.0	11.3	10.0	8.5	8.1	149	19.0	22.5	16.0	10.1	11.6
118	18.1	8.1	8.3	5.8	5.6	118	18.1	17.8	13.8	7.6	8.7
114	0.8	0.2	0.1	0.2	0.2	114	0.8	0.1	0.1	0.1	0.1
146	9.9	5.0	5.5	3.9	4.0	146	9.9	9.8	7.6	4.5	5.4
153	86.5	39.5	45.5	28.2	32.1	153	86.5	84.7	67.1	37.2	46.0
105	2.7	1.2	1.0	0.8	0.9	105	2.7	2.3	1.8	1.1	1.2
138	40.6	18.2	22.2	13.5	14.1	138	40.6	41.0	31.5	17.1	20.9
187	25.3	12.2	15.7	9.4	10.2	187	25.3	14.4	19.6	11.1	14.2
183	4.9	2.6	3.0	2.2	2.3	183	4.9	5.0	3.9	2.3	2.9
128	3.4	1.9	1.7	1.4	1.4	128	3.4	4.1	3.0	1.8	1.9
167	1.6	1.0	0.8	0.8	0.9	167	1.6	1.8	1.5	0.8	1.0
177	5.2	2.8	3.0	2.3	2.3	177	5.2	5.3	4.2	2.5	3.0
156	1.2	0.8	0.5	0.6	0.7	156	1.2	1.3	1.0	0.5	0.6
157	0.8	0.9	0.5	0.7	0.7	157	0.8	1.2	0.9	0.6	0.5
180	3.7	2.7	2.1	1.6	2.1	180	3.7	5.4	2.9	1.8	2.0
170	0.5	0.5	0.3	0.4	0.5	170	0.5	0.8	0.4	0.2	0.3
189	0.3	0.3	0.1	0.3	0.1	189	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1
PCB Σ 28	307.4	144.4	155.3	106.5	108.0	PCB Σ 28	307.4	285.9	227.8	131.7	147.0

Tabella 31

Le cinetiche di eliminazione hanno dimostrato come nei mitili stabulati in Mar Grande il tempo di dimezzamento sia pari a 29.1 giorni, dimostrando una capacità quasi doppia di depurazione rispetto a quelli mantenuti in laboratorio. Questo risultato lascia ipotizzare che le condizioni ambientali, la disponibilità di cibo, i tassi di filtrazione, il metabolismo, il ciclo riproduttivo, etc. possono influire significativamente sui processi di eliminazione dei contaminanti.

In questi casi, parametri come il contenuto lipidico e l'Indice di Condizione possono dare informazioni importanti sullo stadio fisiologico dei molluschi in quanto essi variano significativamente con lo stadio di maturazione e con la disponibilità di cibo. In generale per i composti organici lipofili, come i PCB, i livelli di contaminazione risultano correlati positivamente con l'Indice di Condizione (IC), che segue una variazione stagionale e valori minimi in corrispondenza dell'emissione dei gameti. Poiché i gameti contengono una elevata concentrazione di lipidi, essenzialmente lipidi neutri nei quali i PCB si ripartiscono, con la loro eliminazione dovrebbe diminuire anche il livello di contaminazione.

Essendo la misura dell'IC diminuita durante il periodo delle prove, si presuppone che la stabulazione dei mitili in entrambi gli esperimenti sia avvenuta in concomitanza della fase iniziale di emissione dei gameti (*spawning*). In questo studio però è stato valutato che la diminuzione di questi contaminanti nei mitili non sembra essere unicamente legata al ciclo riproduttivo degli organismi, in quanto l'analisi statistica non ha mostrato correlazioni significative del contenuto lipidico e dell'Indice di Condizione con i livelli di PCB riscontrati. A tal proposito, sarebbe comunque utile ripetere questo tipo di esperimenti in un periodo (da aprile a luglio) non corrispondente a quello riproduttivo del mitilo, in modo da valutare l'effettiva perdita di contaminanti legata allo spostamento in siti meno o per nulla impattati (in termini di concentrazione di PCB nelle acque e nei sedimenti), rendendo trascurabili gli effetti della condizione fisiologica degli organismi.

6. ASPETTI EMERGENTI E SCENARI DI BONIFICA DEI SEDIMENTI CONTAMINATI DALLE AREE CRITICHE E PRIORITARIE DEL 1° SENO DEL MAR PICCOLO

Il quadro ambientale emerso, valutando i dati e le informazioni disponibili per il Mar Piccolo, corroborato ed integrato in maniera sostanziale dai risultati delle varie attività di studio ed indagine presenti nel Programma di Lavoro ARPA e di cui si sono sin qui esposti gli esiti, dimostra ancora di più l'assoluta peculiarità e complessità del sistema-Mar Piccolo.

Il modello "funzionale" del sito, derivato da tale contesto, ha confermato per molti aspetti generali la presenza di fonti potenzialmente ancora attive di contaminazione (primarie e secondarie), anche sotto condizioni e forzanti di tipo naturale o antropico, ha mostrato le principali vie di trasporto dei contaminanti (apporti delle acque di origine terrigena, risospensione dei sedimenti) e ha sottolineato gli impatti negativi degli stessi (PCB e metalli) sulla componente biologica, in particolare evidenziata dal bioaccumulo nei mitili.

I risultati degli studi hanno, pertanto, rafforzato quanto già emerso dalle attività di caratterizzazione pregresse e sottolineato dalla Regione Puglia nel documento "Contaminazione da policlorobifenili (PCB) nel Mar Piccolo di Taranto" (RSU/COM/2011/00002, del novembre 2011) relativamente all'esistenza di zone all'interno del 1° seno del Mar Piccolo (Area 170 ha e area a nord in prossimità degli ex cantieri Tosi) potenziali sorgenti attive di contaminazione veicolata dai sedimenti contaminati (Figura 121, aree 3).

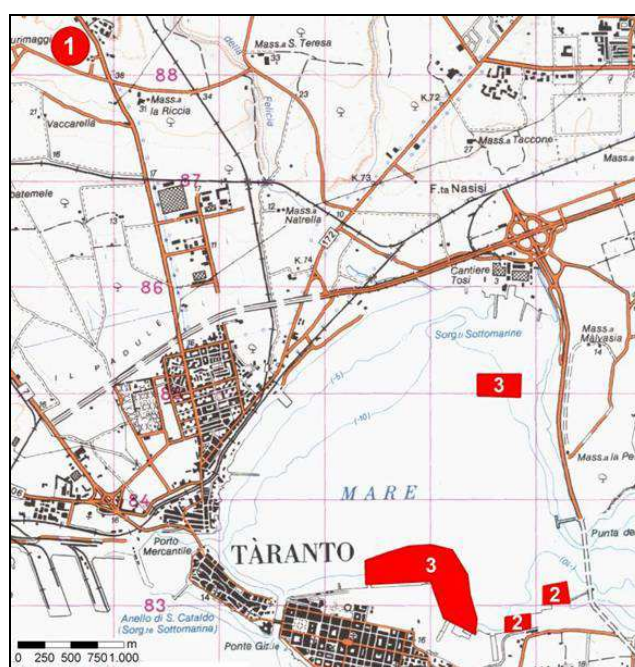


Figura 121

Analogamente le stime, seppur preliminari, delle quantità di contaminanti veicolate dalla componente terrigena delle acque (fonte primaria) verso il 1° seno, sebbene appaiano attualmente non determinanti rispetto a quanto rilevato nei sedimenti, ma pur sempre ininterrotte, non escludono che tale cronico apporto possa contribuire ad un complessivo deterioramento della qualità del sistema, innescando localmente situazioni di criticità, sommandosi al complesso degli impatti negativi sulle componenti ambientali (Capitolo 2).

Il modello concettuale sito-specifico ha anche dimostrato che i processi e le dinamiche esistenti all'interno del sistema ambientale e le numerose variabili di ordine naturale e/o antropico presenti non consentono di restituire un'univoca soluzione d'intervento che sia sola, esclusiva e risolutiva delle criticità emergenti.

Si è altresì delineata la convinzione, suffragata proprio dai risultati delle attività d'indagine, che ad un unico modello rappresentativo del Mar Piccolo si associno, piuttosto, una serie di modelli ciascuno con un proprio scenario di riferimento e tra di loro strettamente interconnessi, in cui considerare ed attentamente pesare non solo le variabili tecnico-scientifiche ma anche e soprattutto le componenti di ordine sociale ed economico.

Conseguentemente le strategie d'intervento, finalizzate alla bonifica, si intrecciano e necessitano di un'opportuna ed attenta fase di discussione e condivisione tra i principali *Stakeholder*, con una propedeutica decisione sulla destinazione d'uso dell'area, prima di poter arrivare ad una scelta progettuale che ne individui la/le migliori o una loro combinazione (considerata sia dal punto di vista spaziale sia temporale), sotto gli aspetti di efficacia ed efficienza, tra quelle ambientalmente, tecnologicamente ed economicamente attualmente disponibili (*dragaggio*, *capping* o *reactive capping*, *bioremediation*, *monitored natural attenuation*, ecc.). Inoltre, va tenuto conto che a qualsiasi intervento di bonifica, o loro combinazione, dovrà comunque essere applicato il concetto di "sostenibilità", intesa come un "*processo di gestione e bonifica di un sito contaminato, finalizzato a identificare la migliore soluzione che massimizzi i benefici della sua esecuzione dal punto di vista ambientale, economico e sociale, tramite un processo decisionale condiviso con i portatori di interesse*" (La possibile definizione Italiana di Sostenibilità Applicata alle Bonifiche, *Sustainable Remediation Forum* 2012).

Pur rimandando, pertanto, ad altre sedi le decisioni e scelte di tipo politico-strategiche, al fine di sostanziare dal punto di vista tecnico le opzioni di intervento ritenute meglio applicabili al contesto ambientale del Mar Piccolo, nella presente sezione del documento si ritiene utile fornire alcune linee d'indirizzo generale sulle metodologie di bonifica applicabili (movimentazione, ricoprimento, attenuazione naturale) e che coinvolgono direttamente i sedimenti contaminati nelle aree ritenute prioritarie (Figura 121).

Partendo, dal concetto generale di bonifica, che per i SIN marino-costieri comprende tutti gli interventi, compresa la messa in sicurezza, volti a ripristinare la qualità ambientale eliminando o minimizzando i rischi (impatti) per l'ecosistema acquatico e, conseguentemente, per l'uomo, si sono considerati come interventi di bonifica perseguibili sui sedimenti maggiormente contaminati del 1° seno:

- l'asportazione complessiva dei sedimenti mediante interventi di dragaggio ambientale (*environmental/remedial dredging*), da realizzarsi con tecniche di tipo meccanico o idraulico;
- la ricopertura dei sedimenti con tecniche di *capping*, finalizzate anche al ripristino idrogeomorfologico del fondale;
- la realizzazione di un programma di monitoraggio che valuti l'evoluzione e tendenza dell'attuale contaminazione riscontrata verso una sua "naturale" attenuazione, prevedendo anche interventi che ne possano accelerare o migliorare *la performance*.

Affinché ciascuno intervento o una loro progettazione integrata si traduca in un risultato di bonifica utile, sarà importante programmare un puntuale piano di monitoraggio estensivo di tutti gli interventi che permetta di valutare: a) l'assenza di effetti negativi sull'ambiente circostante; b) l'efficienza delle misure di mitigazione scelte; c) l'efficacia complessiva dell'intervento.

Per completare il quadro generale presentato si è ritenuto utile accompagnare tali scenari da un'analisi del "rischio" ambientale associato evidenziando, così, per ciascuno i pro e i contro della loro realizzazione. Nel Capitolo 7 sarà, quindi, affrontata tale problematica partendo dai parametri che definiscono il rischio (esposizione e vulnerabilità) ed effettuando un'analisi di scenario applicando un approccio multidisciplinare in linea con la metodologia ritenuta valida per lo sviluppo di processi decisionali in siti con presenza di sedimenti contaminati (es. *Chapman et al.*).

Corre l'obbligo, infine, ricordare che a prescindere dal tipo e metodologia di intervento di bonifica ed a maggior ragione nel caso dei sedimenti contaminati, qualsiasi operazione dovrà essere realizzata solo

quando la fonte attiva di contaminazione che ha provocato tale compromissione della matrice sia stata opportunamente e adeguatamente interrotta, contenuta o mitigata.

Il quadro logico-procedurale che si è sin qui tracciato è riassunto in Figura 122.

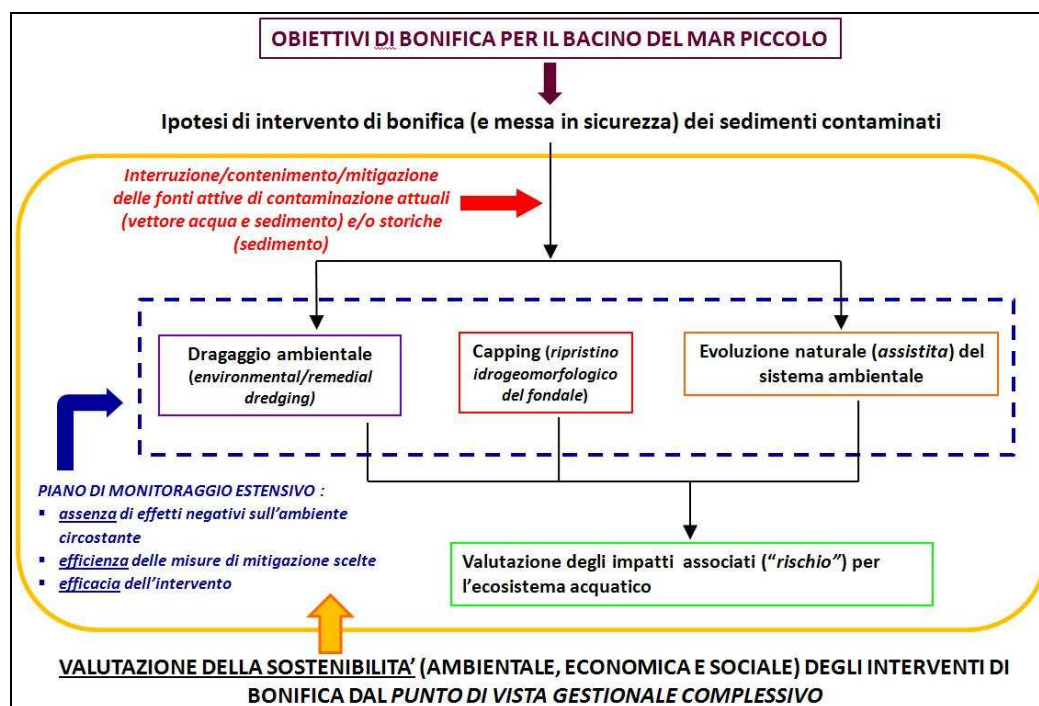


Figura 122. Diagramma logico generale rappresentativo del quadro degli interventi di bonifica (e MIS).

6.1. DRAGAGGIO DEI FONDALI

Le attività di movimentazione dei fondali mediante dragaggio dei sedimenti comporta, in linea generale, una serie di conseguenze di tipo fisico e chimico che coinvolgono sia la componente abiotica, sia quella biologica dell'ecosistema acquatico, per questa ultima legate principalmente all'aumento della torbidità in colonna d'acqua dovuta ai sedimenti risospesi, ma anche alla rimozione/danneggiamento di eventuali biocenosi sensibili e/o ad alta valenza naturalistica presenti sui fondali.

Se ad essere movimentati sono i sedimenti contaminati, gli effetti negativi possono aumentare in quanto aumenta il rischio che ci sia anche una dispersione degli agenti contaminanti nell'ambiente circostante. Pertanto, con particolare riferimento a questo ultimo aspetto, sarà importante prevedere un approccio di tipo "ambientale" nella progettazione del dragaggio dei sedimenti contaminati, applicando anche un sistema di monitoraggio che riscontri gli impatti negativi per tutte le fasi relative all'intervento: allestimento del cantiere, rimozione del sedimento ed, infine, durante la sua successiva gestione (fasi di trasporto, stoccaggio temporaneo, eventuale trattamento e allontanamento definitivo del sedimento dragato).

La soluzione tecnica dovrà essere, quindi, un giusto mix di esigenze di tipo operativo, logistico ed economico ma, soprattutto, di tipo ambientale.

Dal punto di vista della scelta della strumentazione di dragaggio più efficace in tal senso, nel corso degli anni, e man mano che hanno acquisito maggiore peso le esigenze di ordine precauzionale, si sono ideate alcune tipologie di draghe "di tipo ambientale" che, prevedendo adeguati accorgimenti costruttivi mirati ad impedire le perdite di materiale in colonna d'acqua, l'aggiunta di acqua al materiale dragato e migliorare la selettività del dragaggio, possono essere prese in considerazione.

Le tecnologie attualmente a disposizione si dividono in due categorie: sistemi meccanici e sistemi idraulici. Studi specifici di settore hanno anche confermato che, a parte le questioni di ordine tecnico-costruttivo, gli

effetti negativi di un'operazione di dragaggio dipendono anche da un suo adeguato impiego e da caratteristiche sito specifiche (quali ad esempio la granulometria dei materiali coinvolti, e gli aspetti legati alla correntometria e alle condizioni meteomarine). L'estensione e la natura del *plume* di torbida sono quindi legati all'interazione di questi diversi fattori ed ai loro effetti reciproci.

Sistemi di dragaggio ambientale di tipo meccanico

Le draghe meccaniche impiegano forze meccaniche per disgregare, scavare e sollevare i sedimenti, minimizzando la quantità d'acqua rimossa insieme al sedimento.

In generale, quelle di tipo "ambientale" si differenziano da quelle meccaniche classiche in quanto sono dotate di alcuni dispositivi che da un lato contengono la perdita e successiva dispersione di sedimento nella colonna d'acqua durante la fase di risalita e, dall'altro minimizzano l'aggiunta di acqua di processo alla miscela dragata.

Sono particolarmente indicate nel caso di interventi su sedimenti contaminati in quanto offrono un'elevata selettività e precisione nel posizionamento della testa dragante e nel taglio/asportazione del sedimento. Per come operano riescono a prevenire o minimizzarle le perdite di materiale (*spill*) e, conseguentemente, l'incremento della torbidità e dei connessi fenomeni di dispersione della contaminazione. Un altro aspetto da non trascurare è legato all'ottimizzazione delle concentrazioni del materiale dragato.

A questa categoria appartengono le draghe a secchie (*bucket line dredgers*), le draghe a benna o a cucchiaio (*backhoe dredgers*) e le draghe a benna mordente o a grappolo (*grab dredgers*).

Come limiti della tecnica si segnalano: la necessità, nella quasi totalità dei casi, dell'accoppiamento con un sistema di bette per il trasporto dei sedimenti su acqua; le produzioni limitate (metri cubi di materiale rimosso per unità di tempo), una maggior numero di movimentazioni del materiale nei vari passaggi (dalla draga ad una betta di appoggio; dalla betta di appoggio al deposito temporaneo; dal deposito temporaneo a quello finale) e, legata a questa, una minore sicurezza nei confronti di possibili dispersioni di materiale.

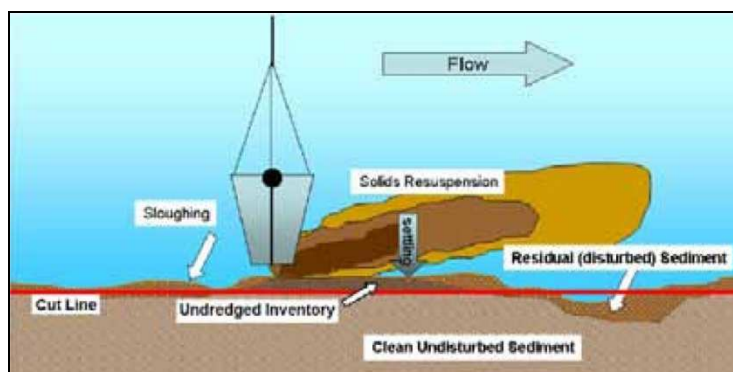


Figura 123

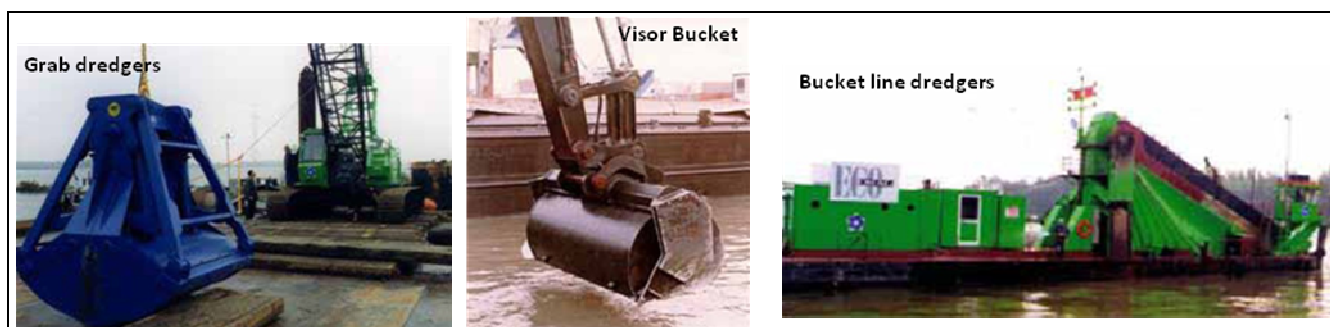


Figura 124

Sistemi di dragaggio ambientale di tipo idraulico

Le draghe di questo tipo utilizzano una forza idraulica di “aspirazione” per sollevare, rimuovere e trasportare mediante pompaggio il sedimento, miscelato all’acqua di processo, verso la destinazione prevista. Qualche volta, in relazione alla tipologia di sedimento da rimuovere, questi sistemi accoppiano anche una forza di tipo meccanico con la quale si smuove il sedimento per migliorarne l’asportazione ed il refluentamento.

A questa categoria appartengono le draghe aspiranti refluenti stazionarie (*suction dredgers*), le aspiranti refluenti stazionarie con disgregatore (*cutter suction dredgers*) e le semoventi aspiranti autocaricanti (*trailing suction hopper dredgers*).

Sebbene, sulla base delle caratteristiche costruttive e di funzionamento (elevate quantità di acqua da gestire, elevata torbidità) non hanno i requisiti necessari ad eseguire un dragaggio di tipo “ambientale”, come per le draghe meccaniche è possibile prevedere dei dispositivi, applicati solitamente alla testa dragante (calotte di copertura della bocca di aspirazione, disgregatori più efficienti), che limitano la turbolenza e la dispersione del materiale nell’intorno, nonché l’aggiunta di acqua “di processo” alla miscela di materiale aspirato.

Tra le draghe ambientali idrauliche si possono annoverare dispositivi noti come “*environmental cutter*” e poi la draga spazzatrice (*sweep dredger*), la draga a paletta (*scoop dredger*), la draga a disco (*bottom disc dredger*) e la draga a coclea (*auger dredger*). Sono stati, inoltre, realizzati e brevettati sistemi che operano impiegando una differente modalità di aspirazione del sedimento, come il *Pneuma System*, che opera grazie all’azione dell’aria compressa, o mini-sistemi draganti (*sludge buster*) che aumentando la precisione dell’intervento. Una rapida rassegna visiva è riportata in Figura 125. Si fa presente, comunque, che accanto a questo tipo di draghe e tecnologie di dragaggio ad oggi esistenti sul mercato, le necessità tecnico – operative potrebbero anche indirizzare la scelta verso la progettazione di dispositivi *ad hoc*.



Figura 125

In generale, le draghe ambientali idrauliche se da un lato sono in grado di assicurare una discreta accuratezza e selettività di scavo, minimi rilasci di materiale dovuti a fenomeni di turbolenza ed una velocità di esecuzione maggiore, dall'altro hanno un impatto maggiore per quanto riguarda i costi di gestione (acqua di processo eventualmente da trattare, necessità di prevedere un bacino di decantazione del materiale dragato prima di poter essere reso trasportabile verso la destinazione finale).

Misure di mitigazione

La formazione della torbida è un aspetto “sistematico” e non “accidentale” che si innesca ogni qualvolta i sedimenti dei fondali sono sottoposti a movimentazione. Per questo motivo, accanto agli accorgimenti di ordine tecnico-costruttivo ed operativo dei sistemi di dragaggio “ambientali” (meccanici o idraulici) utilizzati, si dovranno comunque applicare ulteriori misure ed accorgimenti finalizzati al contenimento totale della torbidità nell'area oggetto dell'intervento. Tali misure consistono principalmente nell'installazione di sistemi di conterminazione degli specchi acquei interessati dalle operazioni di escavo, mediante i quali si evita che le particelle risospese dall'attività di dragaggio vadano a disperdersi liberamente nelle acque circostanti. Le due principali tecniche di conterminazione attualmente disponibili sono le barriere rigide (e fisse), tipo Palancole metalliche infisse, e le barriere flessibili (fisse o mobili), tipo reti idrauliche di geotessuto e panne galleggianti (Figura 126).

La scelta di un sistema o dell'altro dipendono dalle caratteristiche dell'area da dragare (idrodinamismo, batimetria, tipologia ed ampiezza dell'area di intervento, ecc.), della logistica del trasporto del sedimento rimosso, dalle tempistiche di realizzazione e dai costi dell'intervento. Non è escluso che i due sistemi posano essere integrati, in particolari condizioni, ad esempio prevedendo una conterminazione generale dell'area operata con un sistema di palancole in accoppiamento ad un sistema di panne nell'intorno del mezzo dragante.

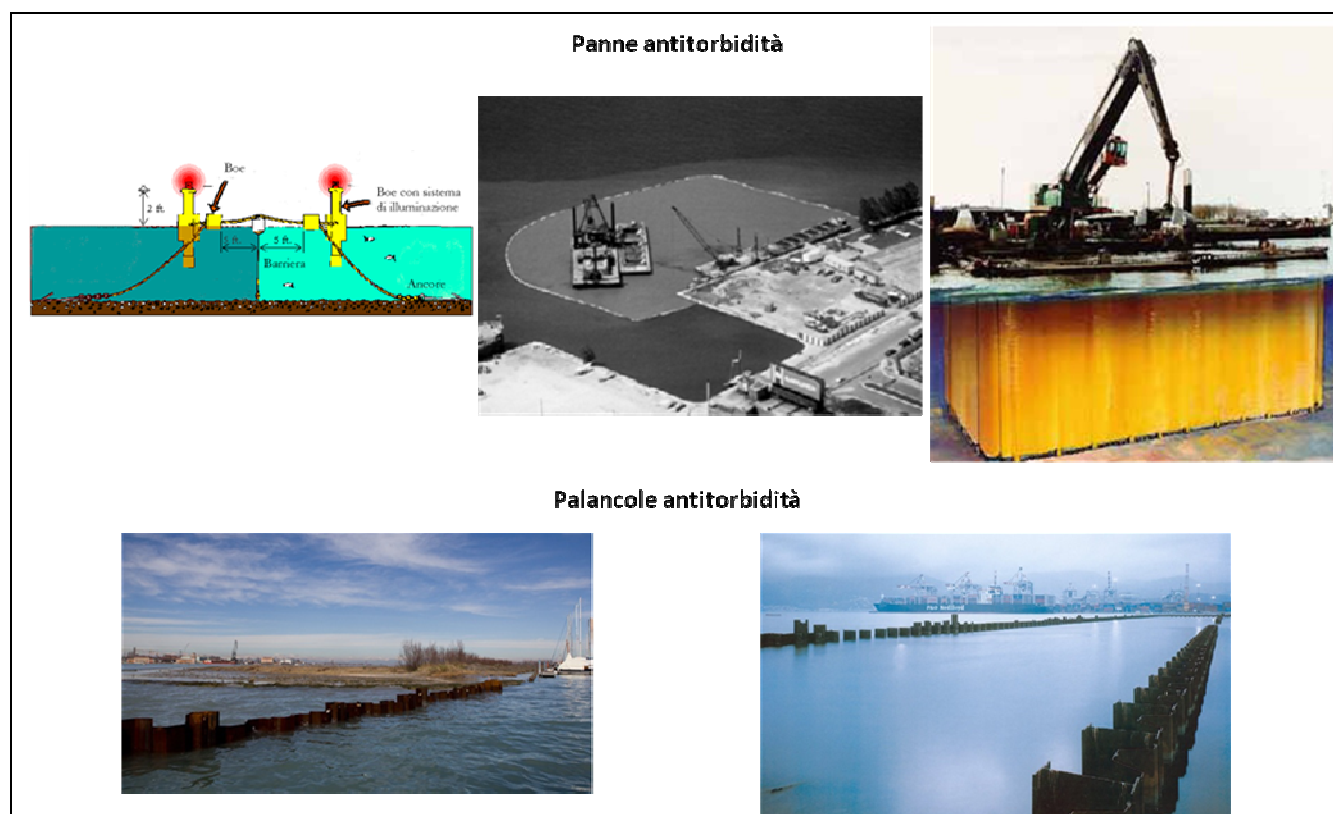


Figura 126

6.1.1. Analisi del trasporto solido a seguito di interventi di dragaggio dei sedimenti (a cura del Politecnico di Bari)

A supporto della valutazione del dragaggio come possibile intervento di bonifica si è ritenuto interessante analizzare il trasporto solido dei sedimenti conseguente a tale azione, ponendo come parametri da considerare il modello di circolazione delle masse d'acqua, le caratteristiche batimetriche dell'area, emerse dalle indagini di tipo geofisico e geomorfologico e, infine, le caratteristiche granulometriche medie e potenzialmente associabili ai sedimenti presenti nelle due aree prioritarie ai fini della bonifica del 1° seno (Figura 121). Il risultato è stato una serie di mappe di distribuzione dei sedimenti risospesi e ridepositati, che descrivono dove e come la plume di questo materiale si ridistribuisce, fornendo informazioni anche sul suo riaccumulo sul fondale (quantità espresse in g/m²).

Per eseguire la simulazione sono stati presi in considerazione alcuni fattori "al contorno", di seguito riassunti, che di fatto semplificano il modello di trasporto, ma che sono necessari per definire l'ambito di applicazione dello studio.

- a) Per ciascuna delle aree prioritarie coinvolte (Area 170 ha e zona nord-est del 1° seno) si sono considerate due aree test estese 10 ha, uno spessore di dragaggio pari ai primi 50 cm di sedimento e, conseguentemente, un volume complessivo da dragare stimato in 50.000 m³ per ciascuna area test. Nel caso dell'Area 170 ha, i 10 ha corrispondono ad un'area centrale posta al suo interno, mentre per la zona a nord-est del 1° seno, corrispondono sostanzialmente all'intera superficie considerata come area prioritaria.
- b) Dal punto di vista della composizione granulometrica dei sedimenti, si è visto come, soprattutto nei livelli superficiali, si osserva una significativa eteropia del materiale sedimentato, variabile sensibilmente anche a breve distanza. Dovendo avere un riferimento generale per le aree test in oggetto, si è optato per due condizioni medie associabili ad un sedimento di tipo fine, variabile da limoso (limo-sabbioso) ad argilloso. Per le simulazioni si sono, pertanto, considerati sedimenti con un valore di D₅₀ pari a 0.016 mm, rappresentativo di un materiale limo-sabbioso, e sedimenti con un valore di D₅₀ pari a 0.002 mm, indicativi di un materiale argilloso.
- c) Per quanto riguarda la tecnica di dragaggio da utilizzare nelle simulazioni, per avere un quadro realistico ancorché ipotetico di un intervento, si sono considerate, con le dovute approssimazioni, due situazioni standard e opposte (Figura 127). È stato, infatti, supposto un dragaggio di tipo idraulico impiegando un sistema di dragaggio "non ambientale", per avere indicazioni su una situazione per così dire "peggiore", ed un dragaggio "ambientale" di tipo meccanico, per avere riscontro di un intervento che utilizza un sistema ambientalmente più cautelativo. In particolare si è ipotizzato un sistema di tipo idraulico che impiega una draga idraulica aspirante refluyente con disgregatore (tipo *cutter head*), mentre per quello di tipo meccanico, si è ipotizzato l'utilizzo di una draga di tipo *grab dredgers*. Le caratteristiche tecniche principali, valutate come valori medi sulla base dei riferimenti bibliografici disponibili, sono state: un fattore di risospensione R pari a 2.5% (dragaggio idraulico) e 1.5% (dragaggio meccanico) ed una portata massica di materiale risospeso dalla draga W 5.56 Kg/s (dragaggio idraulico) e 3.44 Kg/s (dragaggio meccanico).
- d) Per le tempistiche di realizzazione degli interventi, tenuto conto dell'estensione delle aree test, della tipologia di materiale presente, delle caratteristiche medie della strumentazione impiegata e nell'ipotesi che la draga operi per 12 ore/die, si è stimato un periodo dell'ordine delle due settimane.
- e) Per quanto attiene le condizioni al contorno relative alle condizioni circolatorie medie delle masse d'acqua in Mar Piccolo, le simulazioni del trasporto solido sono state realizzate considerando entrambi i periodi, invernale ed estivo, esaminati per definire il modello di circolazione della acque.
- f) Volutamente le simulazioni sono state elaborate in assenza di qualsiasi misura di mitigazione/attenuazione della plume di torbida (ad es. panne galleggianti o palancole), in quanto la finalità è stata quella di valutare, anche solo nel caso di un intervento circoscritto (10 ha) e di spessore

limitato (50 cm), l'andamento e direzionalità della plume in relazione esclusivamente alla modellazione della circolazione ed alle aree verosimilmente coinvolte dalla rideposizione della plume medesima.

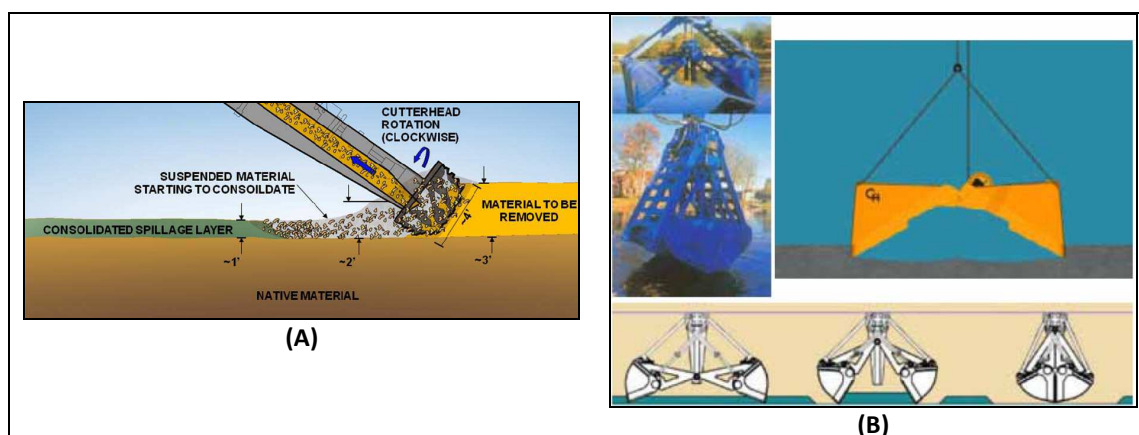


Figura 127

Nelle Figure Figura 128 alla Figura 133 sono riportate le immagini relative agli accumuli di sedimenti risospesi e ridepositati al termine delle due settimane di attività di rimozione. In particolare la Figura 128 e la Figura 129 indicano rispettivamente gli effetti di un dragaggio di tipo idraulico operato in entrambe le aree test per un sedimento limo-sabbioso, nell'ipotesi di una circolazione di tipo "invernale" e di tipo "estivo". In Figura 130 e Figura 131, invece, si è sempre riportato per un dragaggio idraulico, l'andamento della plume di deposizione dei sedimenti risospesi e ridepositati, ma nell'ipotesi di un sedimento a granulometria argillosa, rispettivamente per una circolazione invernale ed estiva. Infine nella Figura 132 e nella Figura 133 la simulazione ha visto gli effetti dell'impiego della draga meccanica, così come precedentemente indicato, su un materiale argilloso e sempre in relazione alle due tipologie di circolazione (invernale ed estivo).

Per una trattazione di maggior dettaglio si rimanda alla lettura degli Allegato 5 che riportano i dettagli delle simulazioni presentate, mentre in questa sede è importante rilevare che, in linea generale:

- per tutti i casi esaminati la concentrazione dei sedimenti in sospensione è massima in corrispondenza della zona dragata, può interessare anche aree limitrofe più prossime ed estendersi all'intero bacino del 1° seno e, in alcuni casi, coinvolgere anche il 2° seno.
- la tipologia (granulometria) di sedimento gioca un ruolo importante sulla distribuzione della plume di sedimenti sospesi e ridepositati: un sedimento più fine, naturalmente, si solleva molto più facilmente e "viaggia" in sospensione per un tratto maggiore;
- a prescindere dalla granulometria considerata (limosa o argillosa), e come era anche logico attendersi, un dragaggio di tipo idraulico "non ambientale" provoca un effetto maggiore sulla risospensione e, conseguentemente, rideposizione dei sedimenti in entrambe le due aree test scelte, a prescindere dal periodo dell'anno in cui si opera (inverno o estate);
- indipendentemente dalla granulometria considerata e della tipologia di strumentazione scelta (idraulica o meccanica), gli effetti sul trasporto solido delle particelle risospese sono più enfatizzati nel caso di una circolazione media di tipo estivo.

In particolare:

- Nell'area test scelta all'interno dell' "Area 170 ha" ed in inverno, operando un dragaggio idraulico, nel caso di sedimenti limo-sabbiosi, si ha un accumulo di sedimenti risospesi che interessa soprattutto il 1° seno, nella sua area più meridionale ed occidentale, con valori massimi nella zona dragata. L'accumulo interessa via via porzioni crescenti interessando anche piccole zone in prossimità Arsenale ed entrando

anche nella parte meridionale del 2° seno con valori non superiori ai 250 g/m². Quest'ultimo aspetto, nel caso di una simulazione con materiali più fini (argille), evidenzia un maggiore migrazione verso il 2° seno ed un accumulo di sedimenti a cavallo del Ponte Punta Penna con valori stimabili tra 1000 e 2000 g/m². La simulazione eseguita sempre in inverno e considerando, invece, l'impiego di una draga meccanica su un sedimento fine argilloso, restituisce una visione per alcuni aspetti simile al caso draga idraulica/sedimento argilloso ma con una movimentazione più contenuta del materiale.

- Nell'area test scelta a nord-est del 1° seno ed in inverno, a prescindere sia della tecnica di dragaggio sia della granulometria ipotizzata, la plume di sedimento piega verso la parte nord-occidentale del bacino non interessando il 2° seno. Parte del sedimento risospeso più fine argilloso, invece, tende ad accumularsi anche a ridosso dell'area dell'Arsenale comunque si operi.
- In estate si osserva, in generale, una maggiore movimentazione del sedimento e, conseguentemente, maggiori accumuli comunque sempre decrescenti man mano che ci si allontana dal centro delle operazioni. Nell'area test scelta all'interno dell' "Area 170 ha", in tutte le condizioni, la maggiore quantità di materiale si accumula in direzione est coinvolgendo tutta l'area costiera militare. Inoltre, a prescindere dalla tecnica di dragaggio, il coinvolgimento del 2° seno è maggiore con effetti più evidente nel caso di sedimenti di minori dimensioni. Nel caso del dragaggio idraulico, parte del materiale tende ad accumularsi anche verso due zone a nord-est del 1° seno (ex Cantieri Tosi e verso l'istmo di collegamento tra i due seni).
- Risultati differenti si osservano, invece, per il dragaggio eseguito nell'area test a nord-est del 1° seno, dove, in estate, si osserva una direzione della plume verso sud sud-ovest interessando il 2° seno quando la dimensione del materiale diminuisce, coinvolgendo la zona a ridosso dei Cantieri Buffoluto (valori non superiori ai 250 g/m²).

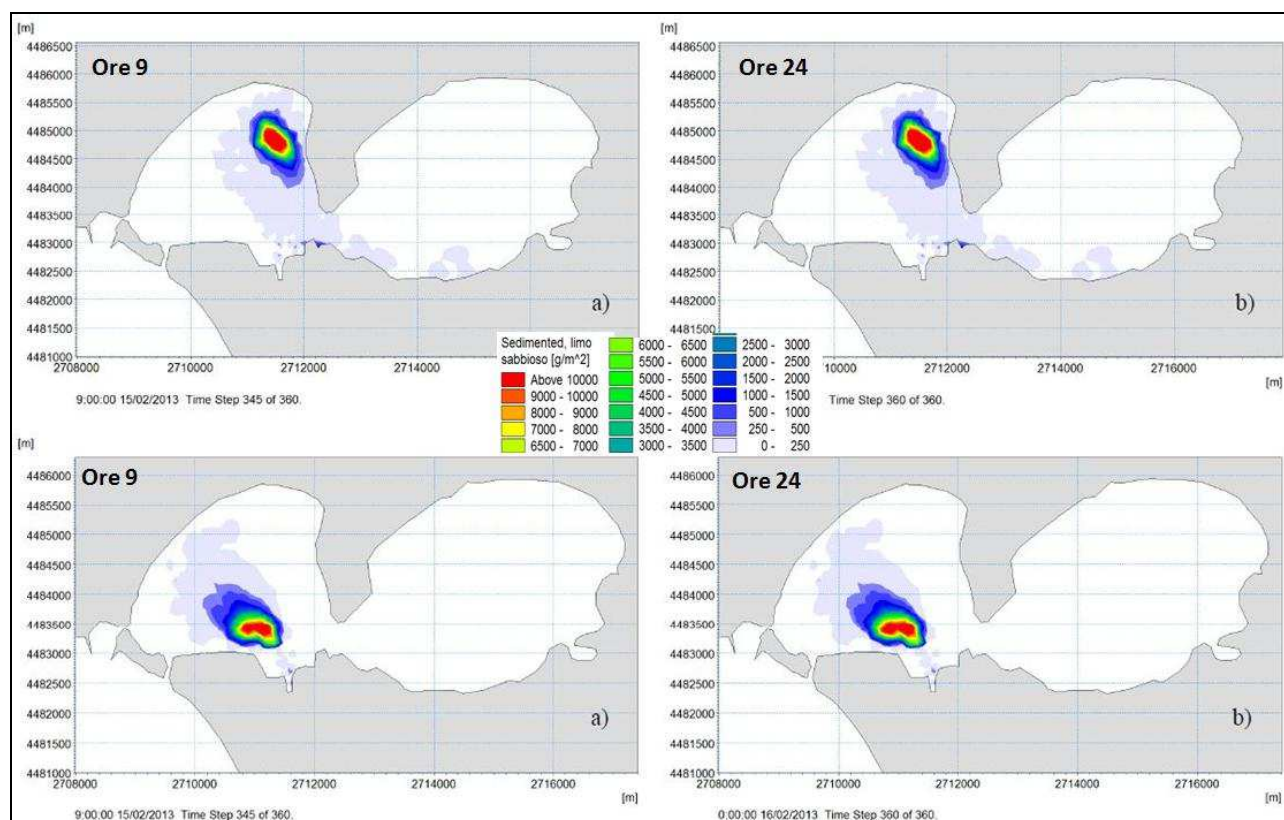


Figura 128

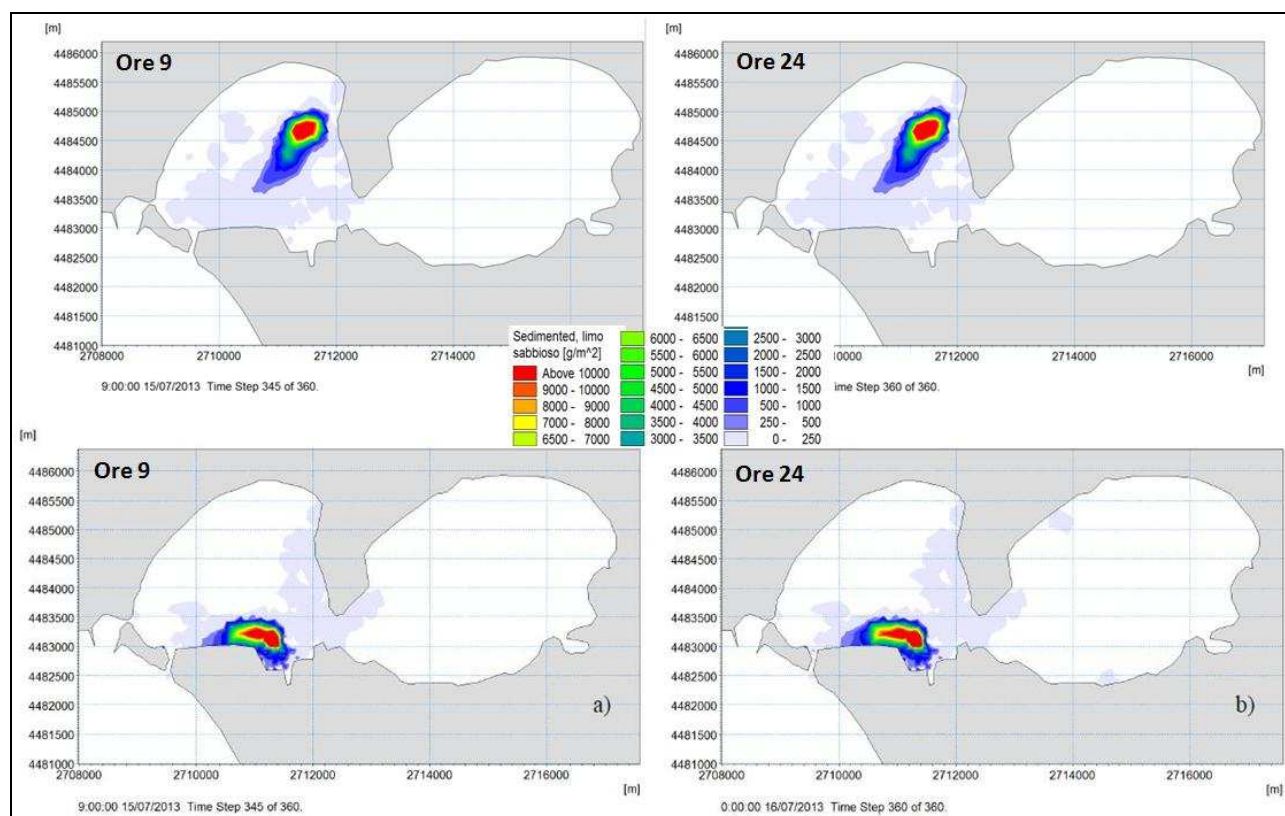


Figura 129

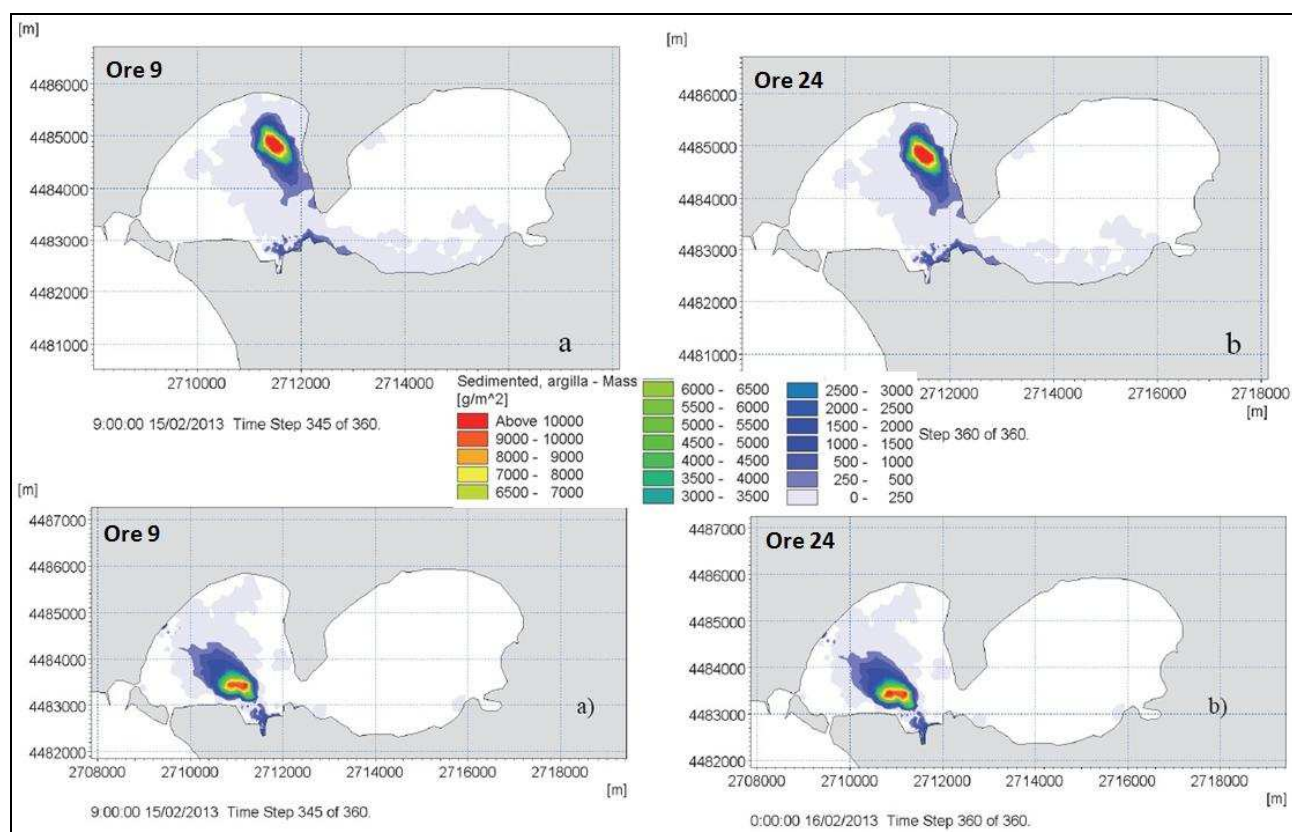


Figura 130

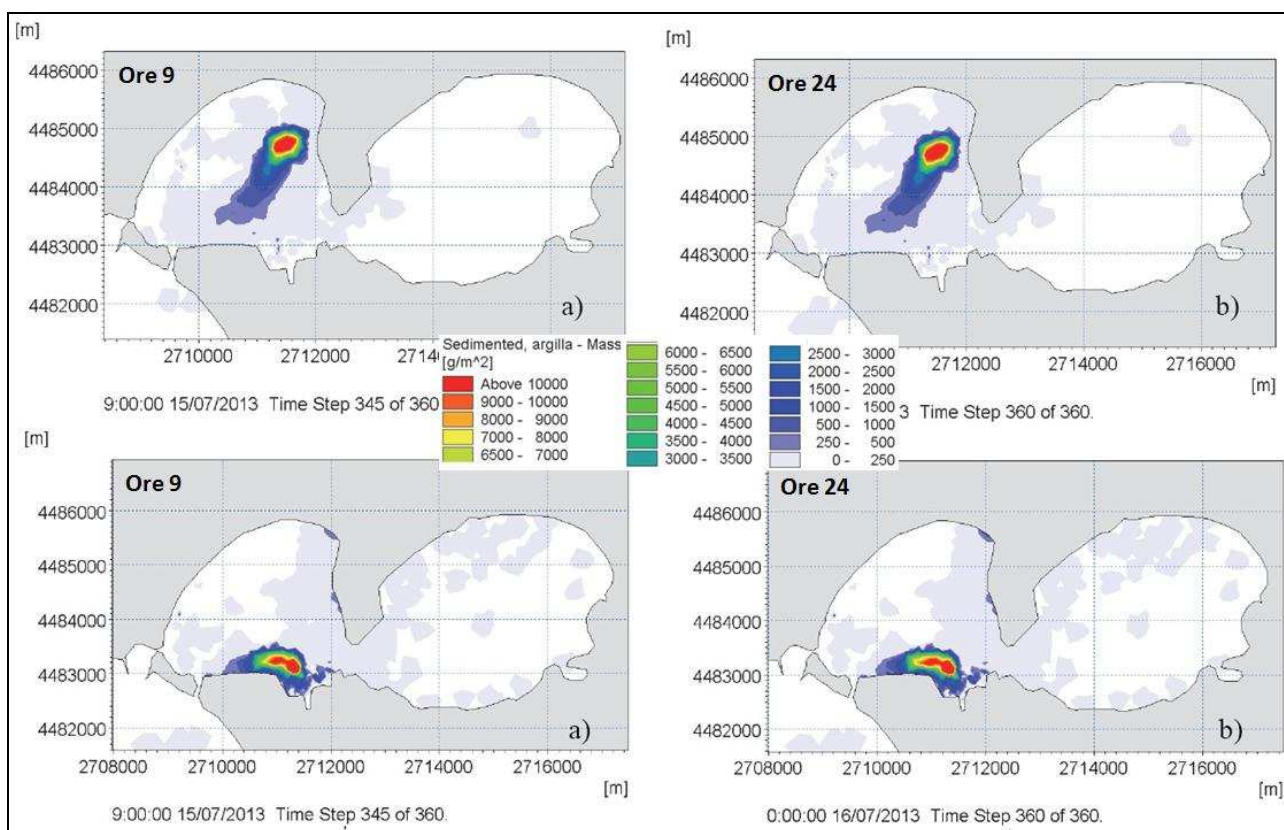


Figura 131

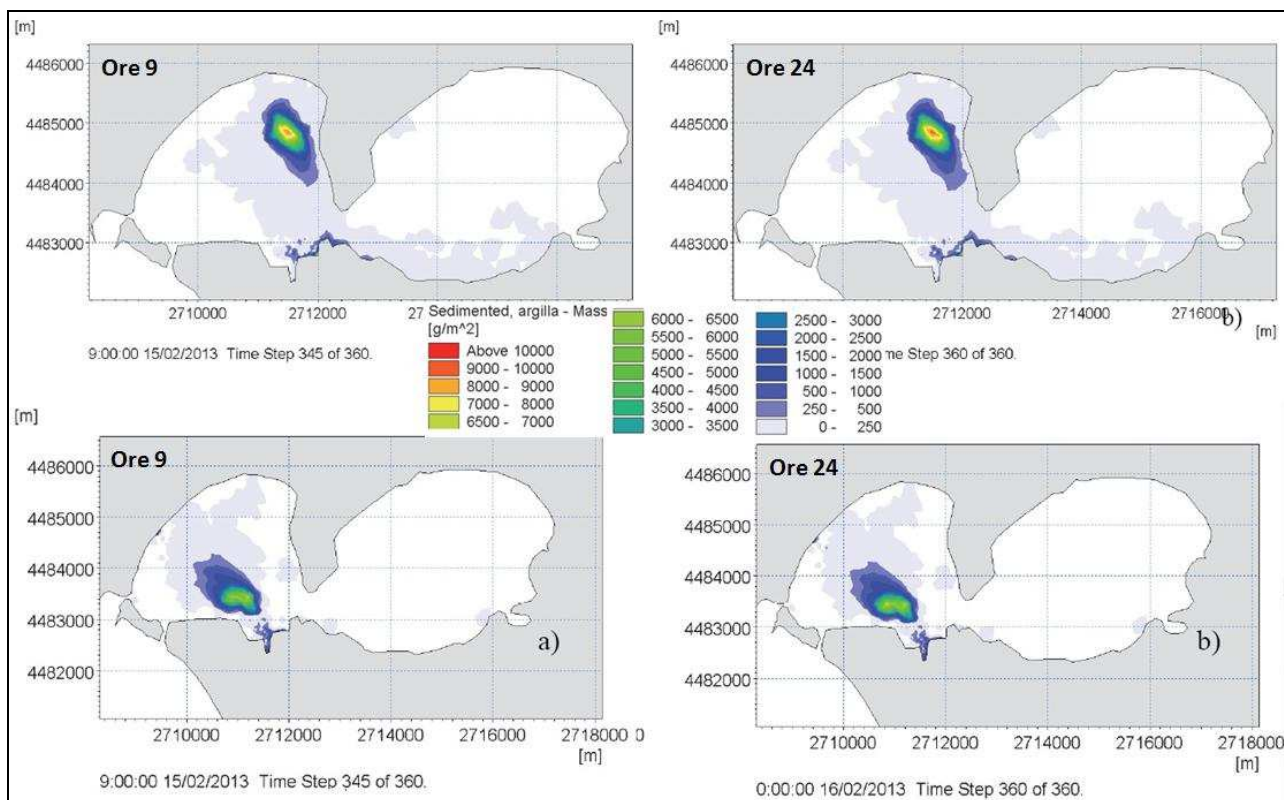


Figura 132

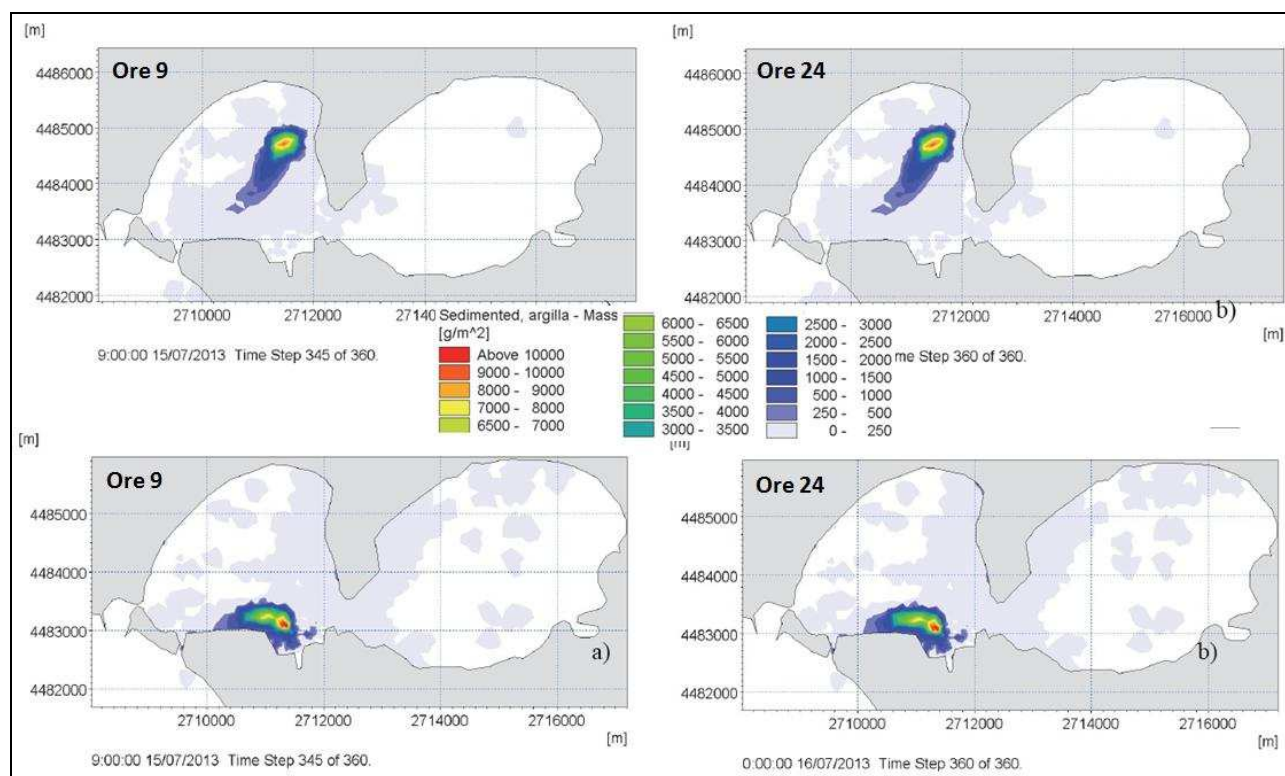


Figura 133

6.1.2. Integrazione tra la modellazione della circolazione marina e la valutazione della biodisponibilità e rilascio dei contaminanti dai sedimenti

ARPA Puglia, attraverso un approccio di tipo speculativo, per contribuire a descrivere lo scenario correlato alle operazioni di dragaggio ha tentato di integrare gli aspetti derivanti dalla modellazione della circolazione marina con la valutazione della biodisponibilità e rilascio dei contaminanti dai sedimenti, sulla base delle simulazioni del trasporto solido derivante da interventi di dragaggio. Le considerazioni di ordine tecnico-scientifiche sono di carattere generale e preliminari e, pertanto, soggette ad ampi margini di miglioramento a seguito della disponibilità di ulteriori e più strutturati dati.

Si premettere, inoltre, che tale sintesi ha richiesto una necessaria semplificazione, seppur ragionata, del sistema ambientale e delle variabili al suo contorno, ricorrendo ad alcune necessarie e indispensabili ipotesi di partenza.

Il primo assunto, richiamato anche nella sezione dedicata alla modellazione della circolazione marina, è che l'attività di dragaggio sia simulata per un'area test estesa circa 10 ha (sia per l'Area 170 ha sia per l'area a nord-est del 1° seno), mentre l'estensione delle aree del Mar Piccolo-1° Seno potenzialmente interessate da interventi è certamente maggiore. Un altro aspetto da considerare è che, durante le attività di dragaggio (così come simulate), siano risospesi e ridepositati i sedimenti con una concentrazione ed una distribuzione derivata ed approssimata dal modello di circolazione così definito. Pertanto, la distribuzione quantitativa dei sedimenti risospesi e ridepositati deve subire un decremento dal "centro" delle operazioni di dragaggio verso la "periferia", seguendo le traiettorie descritte dal modello di circolazione. Analogamente i tassi di decremento possono essere stimati in maniera proporzionale rispetto ai livelli di distribuzione descritti dal modello di circolazione stesso. Inoltre, si è assunto che le concentrazioni dei contaminanti associati ai sedimenti risospesi e ridepositati dalle attività di dragaggio possano decrescere con la medesima proporzionalità. Un altro fattore da considerare è dato dalle concentrazioni dei contaminanti nei mitili, per le quali si assume che siano in relazione diretta con quelle dei contaminanti associati ai sedimenti risospesi e ridepositati a seguito del dragaggio.

Per quanto riguarda, invece, i parametri di concentrazione presi a modello per la valutazione dei sedimenti e del biota, si fa riferimento, rispettivamente, ai Valori di Intervento indicati da ISPRA per i sedimenti del SIN "Taranto" (Pb = 121 mg/Kg; Hg = 0.8 mg/Kg; Sommatoria PCB = 190 µg/Kg) ed ai Limiti previsti dai Regolamenti CE n. 1881/2006 e 1259/2011 per i molluschi bivalvi (Pb = 1.5 mg/Kg p.u.; Hg = 0.5 mg/Kg p.u.; Sommatoria PCB congeneri "target" 28, 52, 101, 153, 138, 180 = 75 ng/g p.u.).

Infine si assume che le concentrazioni dei contaminanti nei fondali delle aree raggiunte dai sedimenti risospesi e ridepositati siano inizialmente nulle, ovvero i sedimenti risospesi e ridepositati vadano a coprire quelli inizialmente presenti, e che dunque la concentrazione finale risultante derivi solo dal nuovo apporto. Al fine di riportare un esempio grafico-descrittivo di quanto qui assunto, per la zona test di circa 10 ha individuata nell' "Area 170 ha", si riprendono i risultati e le immagini relative all'accumulo dei sedimenti alla fine della simulazione (15° giorno) per un dragaggio idraulico su materiali limo-sabbiosi ed un dragaggio meccanico su materiali argillosi, definiti nel caso di una circolazione di tipo estivo, per considerare le condizioni in cui si ha maggiore diffusione della plume.

Nella Tabella 32 e Tabella 33 si riportano i principali dati stimati, mentre nella Figura 136 e Figura 137 sono restituiti i grafici relativi alla stima delle concentrazioni di contaminanti (Pb, Hg e PCB "target") nei mitili in funzione del tempo di esposizione e della distanza dal punto in cui è simulato il dragaggio dei sedimenti.

Per quanto riguarda le stime di calcolo eseguite (Tabella 32 e Tabella 33), si osserva:

- ❑ Nel caso di un dragaggio idraulico che coinvolgono sedimenti limo-sabbiosi:
 - per i sedimenti risospesi e ridepositati, la concentrazione di Piombo e PCB risulta inferiore ai valori di intervento a distanza superiore, rispettivamente ai 550 m e 700 m circa dal "centro del dragaggio", mentre per il Mercurio tale "attenuazione" la si osserva a partire dai 1.000 m dal "centro del dragaggio";
 - per il bioaccumulo nei mitili, il Piombo ed il Mercurio non superano mai i valori limite per tutte le distanze e durante l'intero periodo di esposizione (T=15, T=30 e T=45);
 - per i PCB si osserva, nei primi 15 giorni di esposizione, un trend di bioaccumulo maggiore rispetto ai restanti periodi di valutazione (T=30 e T=45), ed un superamento, al 45° giorno di esposizione, dei valori limite solo nei primi 400 m dal "centro del dragaggio".
- ❑ Nel caso di un dragaggio meccanico che coinvolgono sedimenti argillosi:
 - per i sedimenti risospesi e ridepositati, la concentrazione di Piombo e PCB risulta inferiore ai valori di intervento a distanza superiore, rispettivamente ai 520 m e 1010 m circa dal "centro del dragaggio", mentre non si osserva alcuna "attenuazione" per il Mercurio;
 - per il bioaccumulo nei mitili, il Piombo ed il Mercurio non superano mai i valori limite per tutte le distanze e durante l'intero periodo di esposizione (T=15, T=30 e T=45);
 - per i PCB si osserva, nei primi 15 giorni di esposizione, un trend di bioaccumulo maggiore rispetto ai restanti periodi di valutazione (T=30 e T=45), ed un superamento, al 45° giorno di esposizione, dei valori limite solo nei primi 120 m dal "centro del dragaggio".

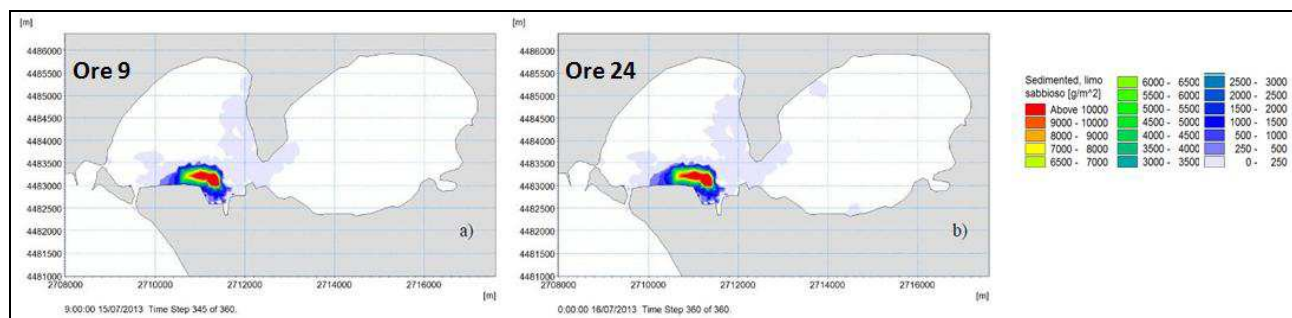


Figura 134

Test estate, "Area 170 ha"	Distanze massime (approssimate) dell'area di dragaggio (m)	Accumulo sedimento in g/m² (sedimento risospeso e ridepositato)	Tasso decremento	Concentrazione stimata nei sedimenti risospesi e ridepositati			Concentrazioni stimata dei contaminanti nei mitili non nativi								
				Pb	Hg	PCB	Pb nei mitili a T=45	Hg nei mitili a T=45	PCB nei mitili a T=45	Pb nei mitili a T=30	Hg nei mitili a T=30	PCB nei mitili a T=30	Pb nei mitili a T=15	Hg nei mitili a T=15	PCB nei mitili a T=15
limite del rosso	400	12000	1	392,0	41,0	3278,0	0,440	0,064	98,500	0,370	0,060	63,600	0,320	0,037	57,000
limite del giallo	500	7000	0,583	228,7	23,9	1912,2	0,257	0,037	57,458	0,216	0,035	37,100	0,187	0,022	33,250
limite del verde	550	3600	0,300	117,6	12,3	983,4	0,132	0,019	29,550	0,111	0,018	19,080	0,096	0,011	17,100
limite del blu	700	800	0,067	26,1	2,7	218,5	0,029	0,004	6,567	0,025	0,004	4,240	0,021	0,002	3,800
limite del viola	1000	450	0,038	14,7	1,5	122,9	0,017	0,002	3,694	0,014	0,002	2,385	0,012	0,001	2,138
limite viola chiarissimo	2500	100	0,008	3,3	0,3	27,3	0,004	0,001	0,821	0,003	0,001	0,530	0,003	0,000	0,475

Tabella 32

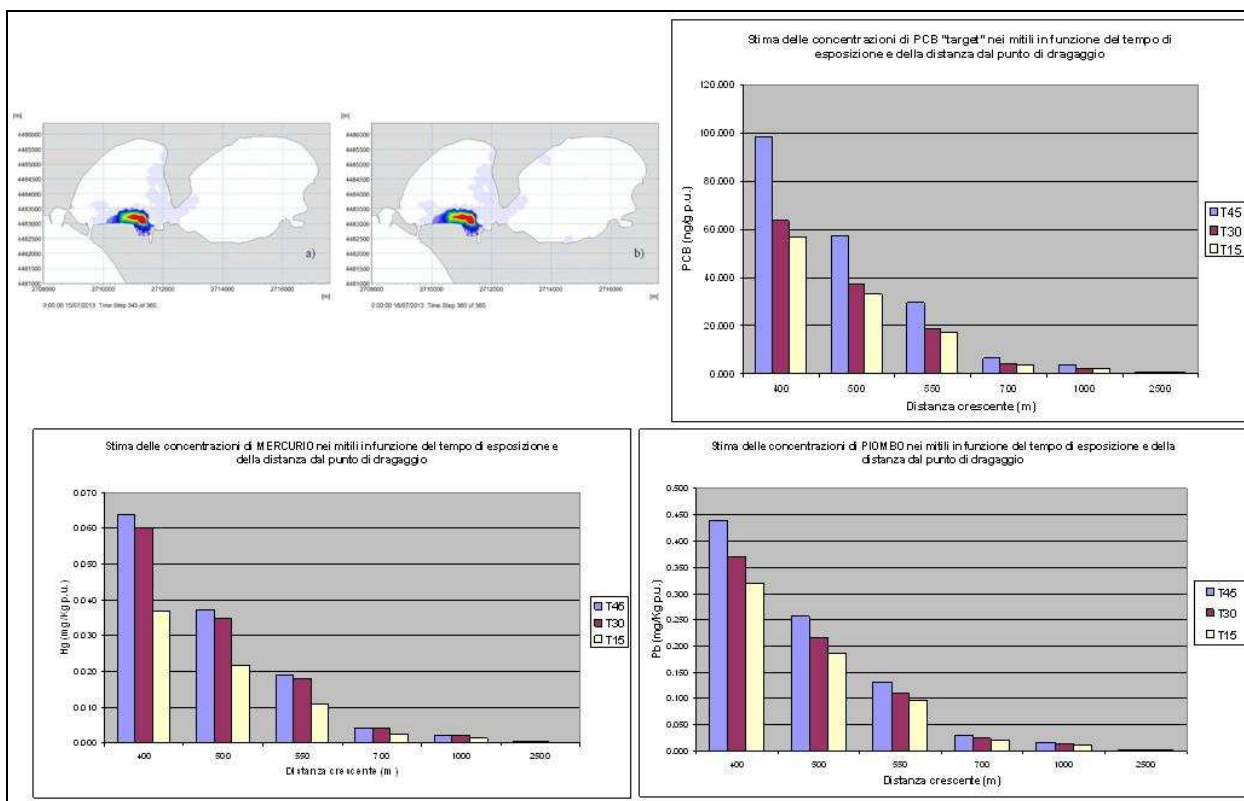


Figura 135. Trend decrescenti di bioaccumulo stimato nei mitili in funzione del tempo di esposizione e della distanza dal “centro del dragaggio”.

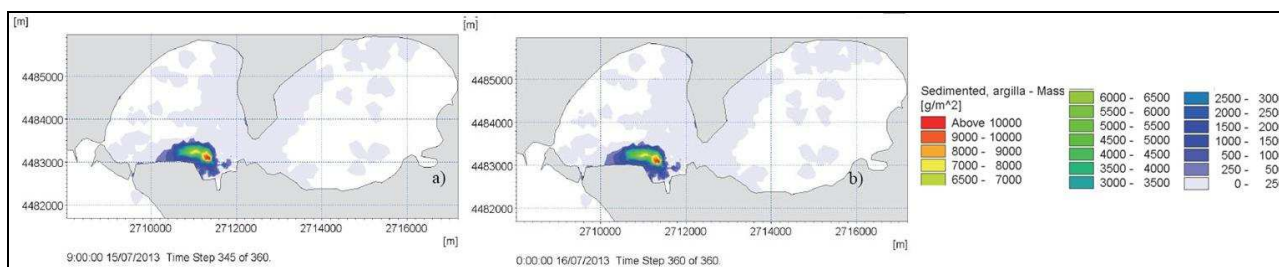


Figura 136

Test estate, "Area 170 ha"	Distanze max approx. dal centro dell'area di dragaggio (m)	Accumulo sedimento in g/m² (risospeso e ridepositato)	Tasso decremento	Concentrazione stimata dei contaminanti nei sedimenti risospesi e ridepositati			Concentrazione stimata dei contaminanti nei mitili non nativi								
				Pb	Hg	PCB	Pb a T=45	Hg a T=45	PCB a T=45	Pb a T=30	Hg a T=30	PCB a T=30	Pb a T=15	Hg a T=15	PCB a T=15
limite del rosso	100	10000	1	392	41	3278	0,440	0,064	98,500	0,370	0,060	63,600	0,320	0,037	57,000
limite del giallo	120	8000	0,800	313,600	32,800	2622,400	0,352	0,051	78,800	0,296	0,048	50,880	0,256	0,030	45,600
limite del verde	520	5000	0,500	196,000	20,500	1639,000	0,220	0,032	49,250	0,185	0,030	31,800	0,160	0,019	28,500
limite del blu	1010	1000	0,100	39,200	4,100	327,800	0,044	0,006	9,850	0,037	0,006	6,360	0,032	0,004	5,700
limite del viola	1200	500	0,050	19,600	2,050	163,900	0,022	0,003	4,925	0,019	0,003	3,180	0,016	0,002	2,850
limite viola chiarissimo	2500	250	0,025	9,800	1,025	81,950	0,011	0,002	2,463	0,009	0,002	1,590	0,008	0,001	1,425

Tabella 33

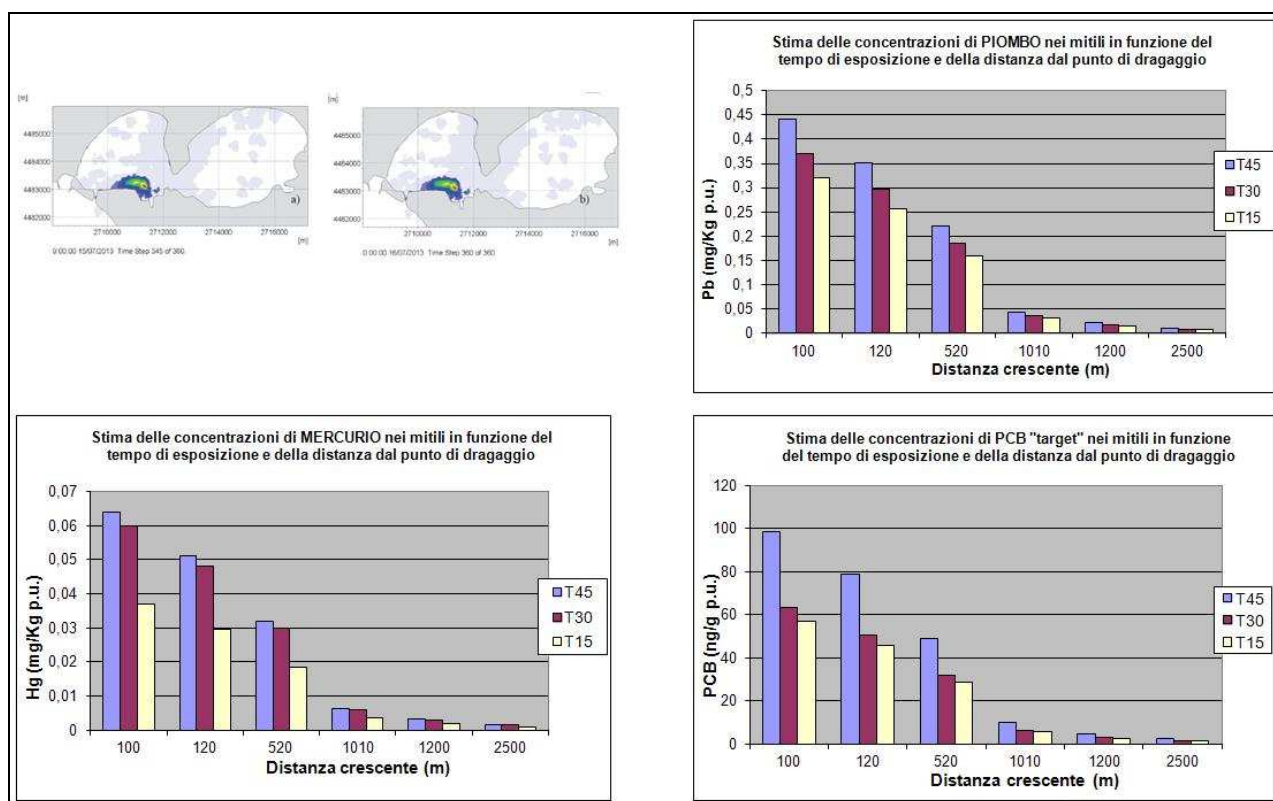


Figura 137. Trend decrescenti di bioaccumulo stimato nei mitili in funzione del tempo di esposizione e della distanza dal "centro del dragaggio".

6.2. IL CAPPING

Il capping è una tecnologia di contenimento/isolamento progettata per la messa in sicurezza *in situ* dei sedimenti contaminati, realizzata disponendo una copertura costituita da uno o più strati di materiale adeguato per granulometria e privo, a sua volta, di evidenze di contaminazione. Tale operazione, pur lasciando i sedimenti contaminati in sito, interrompe il loro contatto con l'ambiente acquatico circostante, limitandone così l'esposizione e tendendo ad immobilizzare i contaminanti nei sedimenti stessi. Coperture innovative, definite "reattive", comprendono all'interno elementi permeabili o impermeabili in più strati, contenenti composti da materiali (resine, additivi, ecc.) che garantiscono una maggiore attenuazione del flusso dei contaminanti.

Può essere realizzato singolarmente o in combinazione con altre tecnologie: ad esempio, dopo una parziale rimozione dei sedimenti, o per rafforzare il recupero naturale (*Natural Monitoring Attenuation*), quando la velocità di sedimentazione naturale non è sufficiente.

Il capping tradizionale è costituito da uno strato di terreno pulito a grana grossa che viene in genere ricoperto da uno strato di protezione costituito da materiale ancora più grossolano (ghiaia, ciottoli e/o massi). Lo spessore del capping e la composizione dei suoi componenti vanno progettati tenendo conto delle condizioni del sito (tipo e quantità di inquinanti e distribuzione nell'area, batimetria e correntometria, caratteristiche fisiche e meccaniche dei sedimenti, habitat naturale, ecc.), della funzione che il capping deve svolgere e dell'arco di tempo in cui tale funzione deve essere garantita. In genere ad un singolo strato è associata una specifica funzione (Figura 138).

In un intervento di capping deve, quindi, considerate le caratteristiche e le forzanti sito specifiche dell'intero "sistema bacino" in cui l'area si colloca. Poiché la finalità è quella di stabilizzare i sedimenti contaminati, è necessario, quindi, che questi siano protetti dall'erosione operata delle correnti acquatiche,

in modo da prevenire la risospensione ed il trasporto di questi verso altri corpi ricettori; isolare fisicamente i sedimenti dagli organismi bentonici (evitare bioturbazione), che interagiscono con essi mescolandoli e muovendoli, contribuendo al rilascio di contaminanti in acqua; isolare chimicamente i sedimenti per ridurre il flusso di contaminanti disciolti o colloidali nell'acqua.

Poiché i siti contaminati sono, tendenzialmente, costituiti da depositi di sedimenti a granulometria fine, uno strato di materiale grossolano, con porosità molto maggiore di quella dei sedimenti contaminati sottostanti, non sarebbe adatto a garantire la stabilità del capping. In genere, quindi, si pone un filtro (tendenzialmente geosintetico, rappresentato da geomembrane semipermeabili e geotessili permeabili), o uno strato di materiale di porosità intermedia tra la parte più fine e quella più grossolana del sedimento. Tale filtro deve comunque assolvere la funzione di lasciar passare l'acqua, pur impedendo il passaggio delle particelle solide più fini, ed evitare la formazione di gas dovuta alla degradazione della sostanze organiche contenute nei sedimenti contaminati.

I materiali solitamente impiegati per le coperture sono la sabbia, il limo e l'argilla (Figura 139). Le caratteristiche fisiche e chimiche dei materiali devono essere compatibili con l'ambiente nel quale verranno posti. La sabbia è relativamente economica, stabile anche su pendenze abbastanza elevate ed attrae specie di organismi che non hanno la capacità di penetrare in profondità. Pertanto, risulta essere particolarmente efficace nell'isolare i sedimenti contaminati dagli organismi bentonici e dalla colonna d'acqua sovrastante e nello stabilizzare i sedimenti e proteggerli dall'erosione. Tuttavia, la sabbia ha una ridotta capacità di adsorbimento, quindi contribuisce in minor misura, rispetto al materiale fine, a rallentare la migrazione dei contaminanti. Per questa ragione, è utile che lo strato di capping, pur se prevalentemente sabbioso, contenga una frazione di materiale fine e di carbonio organico che garantisce una maggiore capacità di contenimento delle sostanze inquinanti.

Nel caso si utilizzino materiali a granulometria fine, come limo ed argilla, servirà valutare dal punto di vista della posa in opera la maggior tendenza alla risospensione che hanno questi materiali e la maggiore instabilità della copertura per la minore resistenza al taglio e l'alto contenuto d'acqua. Inoltre, essi sono particolarmente sensibili alla colonizzazione da parte degli organismi bentonici innescando, conseguentemente, processi di bioturbazione del materiale. Tuttavia, il materiale fine, grazie alla sua attitudine coesiva, rappresenta un'efficace barriera al flusso di contaminanti dovuto ai meccanismi di avvezione e di diffusione della contaminazione.

Quando il capping deve garantire un livello di protezione dall'erosione molto elevato è possibile incrementare il suo spessore oppure sovrapporre allo strato di terreno a grana fine uno strato di materiale granulare (ghiaia e ciottoli).

Un aspetto cruciale nella realizzazione di questo intervento è relativo alla sua messa in opera in quanto potrebbero innescarsi fenomeni di risospensione, anche consistenti, causati dalla caduta del materiale di ricoprimento sui sedimenti da ricoprire e, pertanto, vanno controllati con cura i mezzi da utilizzare, le velocità da impiegare e le aree di fondale da coprire (Figura 140).

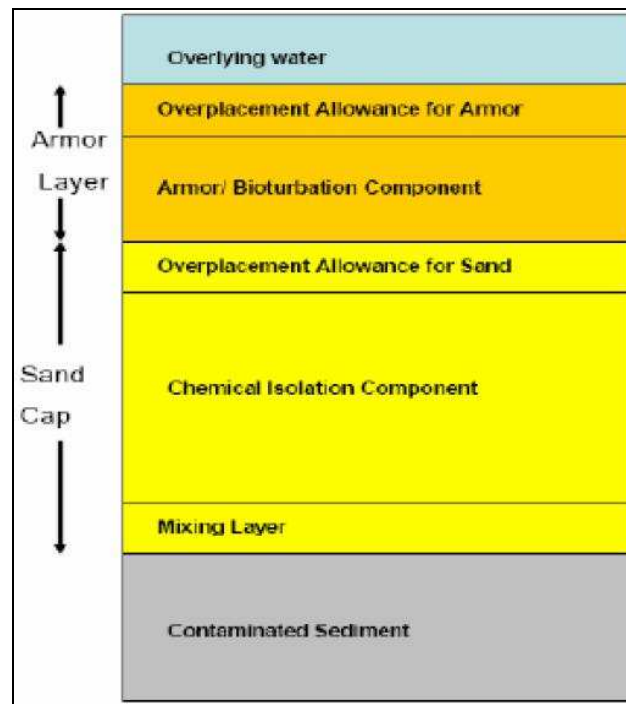


Figura 138

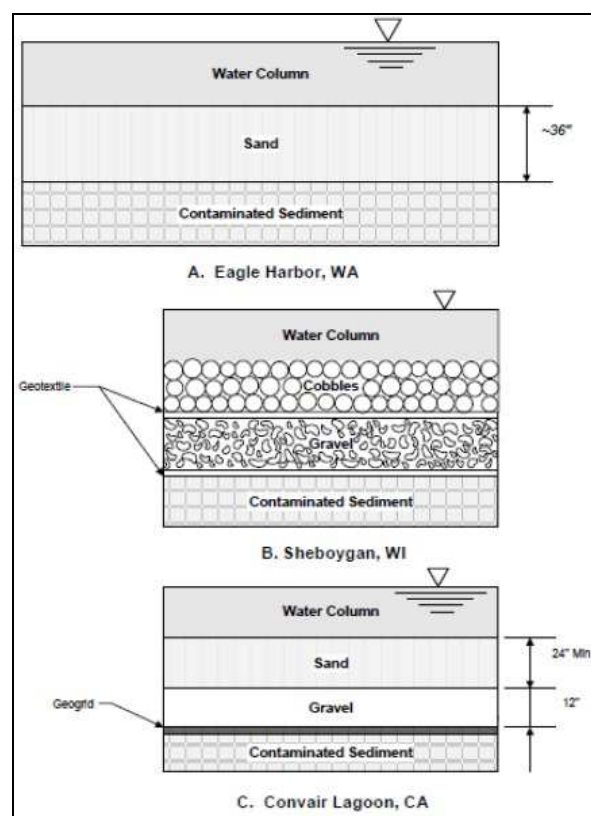


Figura 139

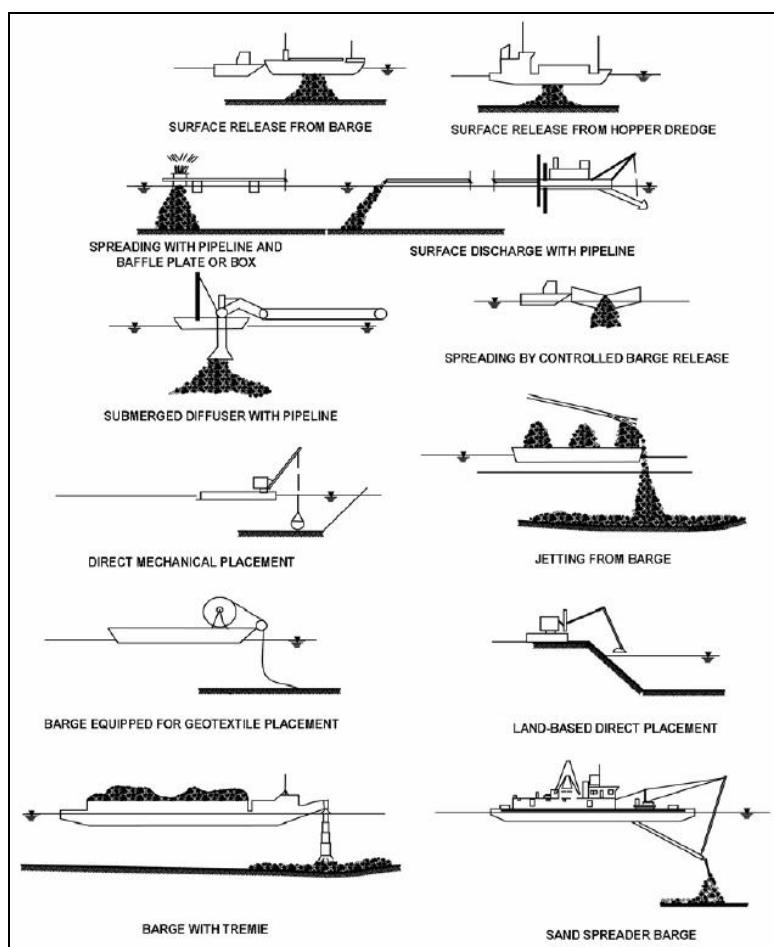


Figura 140

Dal punto di vista strutturale, durante la realizzazione di un capping, sia i sedimenti contaminati sia il materiale costituente il capping, subiscono un cedimento indotto dal processo di consolidazione innescato dal peso proprio degli strati sovrastanti. Mentre il processo di consolidazione degli strati di capping porta ad una diminuzione della porosità intrinseca del materiale, a vantaggio dell'isolamento della contaminazione, nel caso dei sedimenti contaminati questa attività provoca la progressiva espulsione dell'acqua interstiziale presente verso il basso e lateralmente. Anche tale aspetto dovrà essere attentamente valutato in fase di progettazione.

Per migliorare l'efficacia di contenimento è possibile realizzare dei *capping reattivi* (o *attivi*) che, oltre a ricoprire i sedimenti contaminati, operano dei veri e propri trattamenti del contaminante (nel caso in cui sia debolmente legato alla fase solida oppure è associato ad una fase liquida non acquosa e la migrazione di questa fase controlla il flusso all'interfaccia acqua-sedimento).

La capacità di isolamento chimico può essere aumentata impiegando diverse tipologie di additivi e materiali alternativi. Gli additivi possono essere inseriti come un ulteriore strato, o in strati di geotessile, oppure miscelati direttamente allo strato di sedimento contaminato (Figura 141). Tra i più diffusi ammendanti si citano per esempio, l'organoclay, il carbone attivo, gli additivi di fosfato, la bauxite, il ferro zero valente.

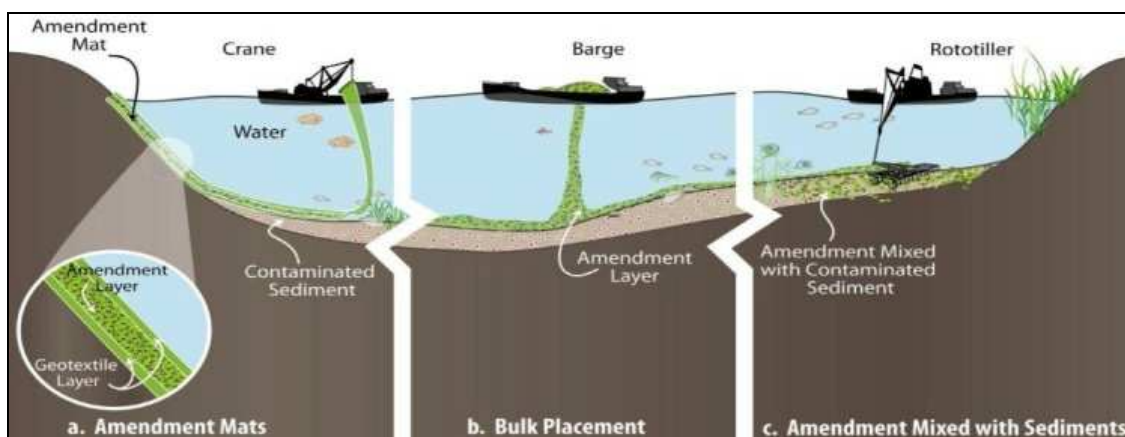


Figura 141

6.2.1. Modellazione di possibili scenari del fondale e scenari di risposta idromeccanica

Al fine di fornire alcuni scenari possibili di risposta del fondale ad un ipotetico intervento di capping in Mar Piccolo, nel seguito si riportano in estrema sintesi alcuni dei risultati derivati valutando le varie risposte idromeccaniche dei sedimenti in relazione agli scenari stratigrafici e corrispondenti modelli geotecnici derivati.

Per un trattamento dettagliato di questi aspetti e per considerazioni in merito al calcolo agli elementi finiti eseguito per valutare i cedimenti di consolidazione con riferimento ai diversi modelli geotecnici ipotizzati, si rimanda all'Allegato 8.

Le ipotesi hanno riguardato la realizzazione di una copertura che imprime in un caso (A) un sovraccarico sul fondale pari a 10 kPa e, nell'altro (caso B), un carico più leggero pari a 2 kPa.

I modelli geotecnici rappresentativi del fondale sono stati tre, in particolare: nel primo caso il modello è costituito da uno strato di 16 m di limo argilloso-sabbioso sovrapposto a 4 m di argilla azzurra ricostruita (Figura 142); nel secondo caso si è ipotizzato un monostrato di 20 m di spessore costituito da terreno argilloso (Figura 143); un terzo caso in cui sono presenti 16 m di sabbie che sovrastano 4 m di argilla azzurra ricostruita (Figura 144).

$\Delta\sigma'_v = 10 \text{ kPa}$		$\Delta\sigma'_v = 2 \text{ kPa}$	
A_1 : $e_0 = 2.350$; $G_s = 2.730$; $\gamma = 15.0 \text{ kN/m}^3$; $C_c = 0.85$	$S_1 = 3 \text{ m}$	A_1 : $e_0 = 2.350$; $G_s = 2.730$; $\gamma = 15.0 \text{ kN/m}^3$; $C_c = 0.85$	$S_1 = 3 \text{ m}$
A_{2a} : $e_0 = 1.550$; $G_s = 2.730$; $\gamma = 18.2 \text{ kN/m}^3$; $C_c = 0.6$	$S_{2a} = 4 \text{ m}$	A_{2a} : $e_0 = 1.550$; $G_s = 2.730$; $\gamma = 18.2 \text{ kN/m}^3$; $C_c = 0.6$	$S_{2a} = 4 \text{ m}$
A_{2b} : $e_0 = 1.300$; $G_s = 2.730$; $\gamma = 18.2 \text{ kN/m}^3$; $C_c = 0.6$	$S_{2b} = 5 \text{ m}$	A_{2b} : $e_0 = 1.300$; $G_s = 2.730$; $\gamma = 18.2 \text{ kN/m}^3$; $C_c = 0.6$	$S_{2b} = 5 \text{ m}$
A_{2c} : $e_0 = 1.100$; $G_s = 2.730$; $\gamma = 18.2 \text{ kN/m}^3$; $C_c = 0.6$	$S_{2c} = 4 \text{ m}$	A_{2c} : $e_0 = 1.100$; $G_s = 2.730$; $\gamma = 18.2 \text{ kN/m}^3$; $C_c = 0.6$	$S_{2c} = 4 \text{ m}$
B_1 : $e_0 = 1.150$; $G_s = 2.730$; $\gamma = 18.2 \text{ kN/m}^3$; $C_c = 0.5$	$S_3 = 4 \text{ m}$	B_1 : $e_0 = 1.150$; $G_s = 2.730$; $\gamma = 18.2 \text{ kN/m}^3$; $C_c = 0.5$	$S_3 = 4 \text{ m}$
a) M1.A		b) M1.B	

Figura 142

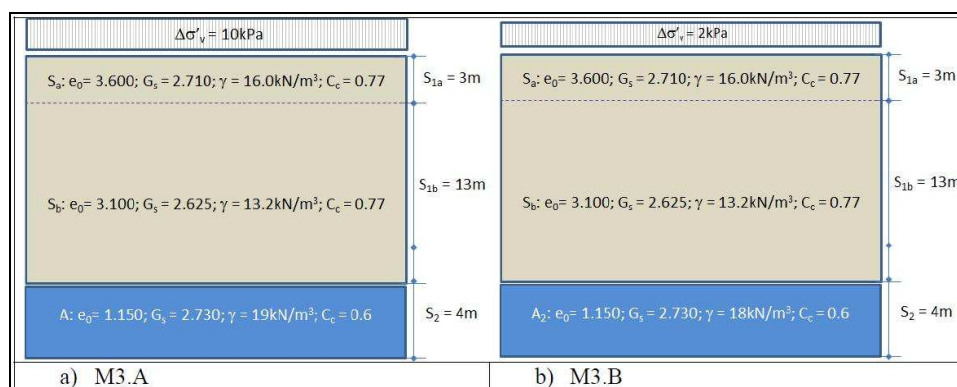


Figura 143

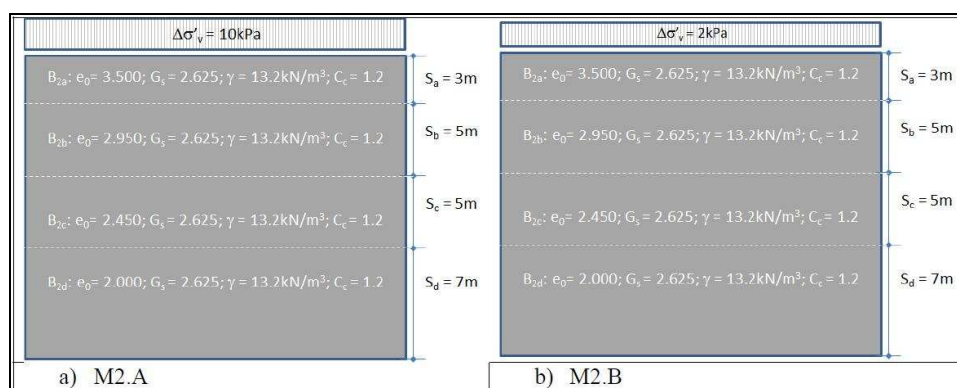


Figura 144

6.3. EVOLUZIONE (ASSISTITA) DEL SISTEMA AMBIENTALE

Con il termine "*attenuazione naturale*" si fa riferimento ai casi in cui il risanamento/bonifica di un sito contaminato si basa sulla capacità potenziale che hanno i processi naturali, in esso presenti, di intaccare la contaminazione riducendone la concentrazione (US-EPA, OSWER-Directive9200:4-17P). I processi coinvolti includono aspetti di tipo fisico, chimico e/o biologico che, sotto condizioni favorevoli, agiscono senza l'intervento antropico per ridurre la massa, la tossicità, la mobilità, il volume e le concentrazioni degli inquinanti nelle matrici compromesse. Questi processi *in situ* includono la biodegradazione, la dispersione la diluizione, l'adsorbimento, la volatilizzazione, la stabilizzazione chimica o biologica, la trasformazione o la distruzione dei contaminanti (Figura 145).

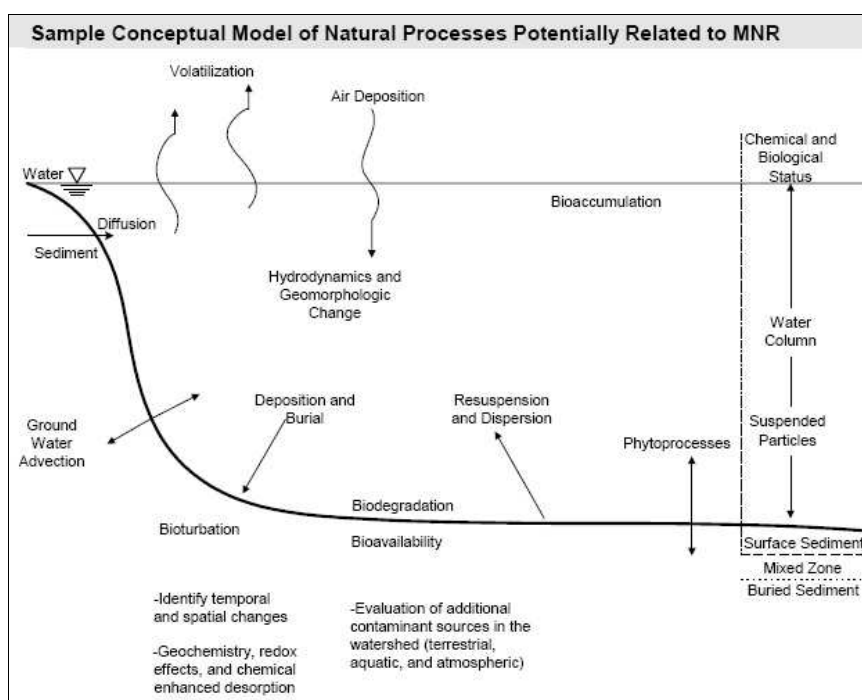


Figura 145

L'Environmental Protection Agency (EPA) attribuisce alla MNR il ruolo di *remediation option* quando: la sorgente della contaminazione sia stata rimossa; i processi di diluizione o di sedimentazione si realizzino con tempistiche "ragionevoli", in funzione degli aspetti ambientali e socio-economici considerati; i sedimenti non subiscano movimentazioni legate ad attività umane o naturali se non quelle (eventualmente) collegate all'intervento; le azioni di bonifica "canoniche" (dragaggio, capping) risultino eccessivamente impattanti dal punto di vista ecologico ed economico.

Talvolta l'attenuazione naturale è associata erroneamente all'approccio "non fare nulla" (o *ipotesi zero, do nothing*) nel procedimento di bonifica di un sito contaminato. In realtà, essendo l'attenuazione naturale un procedimento con cui i processi naturali intervengono trasformando i contaminanti presenti verso composti ambientalmente meno reattivi, la scelta di questa opzione di bonifica va di pari passo con la progettazione di un attento e puntuale piano di verifica e monitoraggio di tali processi naturali di *rimediazione* (*monitoring natural attenuation*), piuttosto che sull'uso di processi ingegnerizzati (es. capping) o di rimozione (dragaggio). Prima di poter proporre tale approccio, pertanto, è importante avere il quadro ambientale e sito specifico ben chiaro, dal punto di vista delle componenti, delle dinamiche e dell'evoluzione, che permetta di valutare la fattibilità di tale processo e la sua possibilità di successo sia dal punto di vista tecnico sia da quello temporale.

Inoltre, se si decide di procedere lungo tale strada, occorre verificare che, i processi di attenuazione naturale non comportino, prima del loro innesco efficace, la presenza prolungata dei contaminanti medesimi e non contemplino la formazione di eventuali prodotti intermedi della decontaminazione che risultino ugualmente tossici per l'ambiente circostante e che, quindi, nel complesso il rischio ambientale (e sanitario) ad essi associato sia in qualche modo prevedibile ed accettabile.

Altri aspetti che vanno opportunamente considerati per la decisione finale, che faccia propendere per questa ipotesi di intervento, sono rappresentati da un lato dall'assenza di potenziali recettori sensibili (flora e fauna acquatica protetta, l'uomo) nell'area oggetto degli interventi e/o in zone contigue ed analogamente interessate, e dall'altro da aspetti che coinvolgono le limitazioni d'uso dell'area, che potrà essere riutilizzata non prima che sia stata completamente decontaminata (es. limitazioni al traffico navale in termini di traiettorie, velocità, pescaggi consentiti, limitazione di acquacoltura).

Un'ipotesi di attenuazione naturale *potenziata*, che intervenga migliorando le tempistiche e l'efficienza di attuazione dei processi naturali, può prevedere un intervento "assistito" da parte dell'uomo che migliori, potenzi e/o induca gli stessi processi chimico-fisici e biologici (biodegradazione, adsorbimento, reazioni chimiche, dispersione e diluizione, ecc.). Questo tipo di opzione potrebbe coniugare e mutuamente soddisfare sia esigenze di tipo ecologico-ambientali, progettando un intervento per alcuni aspetti meno invasivo (come invece potrebbe essere un intervento di dragaggio o di capping) e maggiormente sostenibile, sia aspetti di ordine sociale ed economico, coinvolgendo nell'attuazione degli interventi anche altri portatori d'interesse che fin dalla stessa realizzazione dell'intervento possono trarre un lecito profitto.

7. ANALISI VALUTATIVA DEGLI IMPATTI PER L'ECOSISTEMA ACQUATICO DEL 1° SENO DEL MAR PICCOLO ASSOCIATI AGLI SCENARI DI BONIFICA

La bonifica per i SIN marino-costieri, nel senso generale del termine, comprende tutti gli interventi volti a *ripristinare la qualità ambientale eliminando o minimizzando i rischi (impatti) per l'ecosistema acquatico e, conseguentemente, per l'uomo.*

Nel presente capitolo si intende fornire uno strumento di supporto alle decisioni, in base al quale valutare e orientare le possibili opzioni di messa in sicurezza e/o bonifica dei sedimenti del 1° Seno del Mar Piccolo.

Lo strumento che si è scelto di utilizzare è basato sulla valutazione del rischio associato alle opzioni di gestione delle aree e dei sedimenti contaminati, a partire dalla considerazione generale che un determinato intervento può avere un impatto più o meno elevato sull'ambiente e sulle comunità di un territorio.

I primi tentativi di standardizzazione delle metodologie di analisi di rischio assoluta risalgono a circa venti anni fa quando negli U.S.A. sono stati emanati i primi programmi per fronteggiare il problema del rilascio di prodotti petroliferi dai serbatoi interrati (*Underground Storage Tank programs, UST*) e dei siti contaminati di grandi dimensioni (*Superfund Program*).

La procedura ASTM E-1739 del 1995 applica l'approccio RBCA (*Risk-Based Corrective Action*) ai siti interessati dal rilascio di prodotti petroliferi. Il suo successivo sviluppo estende l'applicabilità della metodologia RBCA a tutti i siti interessati da rilasci di sostanze chimiche. I documenti *Risk Assessment Guidance for Superfund* e *Soil Screening Guidance: User's Guide* prodotti dall'U.S.EPA, costituiscono il punto di partenza di gran parte delle guide tecniche sviluppate dai singoli stati americani.

In ambiente terrestre, l'impiego dello strumento dell'Analisi di Rischio sanitario e ambientale è normata in Italia nell'ambito del D.lgs 152/2006 (Allegato 1 alla Parte IV) e concerne in particolare le attività di bonifica di suolo superficiale e profondo e delle acque sotterranee.

Attualmente in Italia sono utilizzati sia modelli che seguono piuttosto fedelmente la procedura RBCA (RBCA Toolkit e RISC), sia modelli che mutuano le equazioni di calcolo da altre procedure.

La metodologia RBCA si basa su diversi livelli di approfondimento che devono tenere conto anche di valutazioni di tipo economico (costi-benefici). Gli elementi fondamentali che caratterizzano la procedura RBCA possono essere così sintetizzati:

- il livello di protezione dell'uomo e dell'ambiente deve essere mantenuto costante in tutti i livelli di approfondimento dell'analisi di rischio;
- i fattori di sicurezza utilizzati nel calcolo del rischio tendono a diminuire all'aumentare del livello di applicazione dell'analisi di rischio, in funzione della maggiore disponibilità di dati sito-specifici attendibili;
- l'attendibilità e il numero delle informazioni disponibili devono aumentare con il livello di approfondimento dell'analisi di rischio in funzione della maggiore richiesta di dati sito-specifici e della complessità dei modelli di calcolo applicati;
- i costi dell'investigazione tendono ad aumentare con il livello di approfondimento dell'analisi di rischio in funzione della maggiore richiesta di dati sito-specifici in termini di numero e attendibilità (es. uso di attrezzature di campionamento tecnologicamente più avanzate che implicano l'impiego di personale specializzato, impiego di strumentazione ad elevata sensibilità per le determinazioni analitiche, ecc.);
- il rapporto costi/benefici della bonifica: in linea generale, all'aumentare del grado di conoscenza del sito i costi complessivi della bonifica dovrebbero ridursi in ragione di una migliore definizione dei percorsi di esposizione, dei volumi complessivi da trattare, delle caratteristiche delle matrici contaminate.

La metodologia per l'applicazione di detta analisi di rischio tramite l'utilizzo di software commerciali è definita nel documento "Criteri metodologici per l'applicazione dell'analisi assoluta di rischio ai siti contaminati" (Manuale APAT, revisione 2, 2008). Tale documento è stato elaborato dal Gruppo di Lavoro "Analisi di Rischio" istituito e coordinato dall'ISPRA e costituito da rappresentanti dell'Istituto Superiore di Sanità (ISS), dell'INAIL e del Sistema delle Agenzie per l'Ambiente (ARPA/APPA).

Attraverso molteplici modelli analitici collegati alle librerie interne dei fattori di esposizione standard e al database tossicologico e fisico/chimico per oltre 90 sostanze, i software possono pertanto calcolare sia il

livello di rischio in modo diretto che i valori di screening e gli obiettivi di bonifica per ogni percorso di esposizione completo identificato dall'utente. Sulla base delle concentrazioni rappresentative dei contaminanti indice presenti nella matrice contaminata, intesa come mezzo sorgente, e sulla base del modello concettuale predisposto dall'utente, vengono calcolate le concentrazioni massime attese in condizioni stazionarie al punto di esposizione. Ciò viene fatto attraverso i modelli analitici di destino e trasporto che sono quelli descritti nello standard ASTM. Per effettuare il calcolo, il sistema valuta la ripartizione tra i diversi comparti ambientali e il trasporto laterale della sorgente al punto di esposizione. Le varie matrici contaminate e i diversi percorsi di migrazione e vie di esposizione contemplati dai software sono elencati in Tabella 34.

sorgente di contaminazione	modalità di migrazione (*)	via di esposizione	modalità di esposizione	tipo di esposizione	uso del suolo RESIDENZIALE		uso del suolo RICREATIVO		uso del suolo IND/COMM	
					bersaglio on-site (**)	bersaglio off-site	bersaglio on-site	bersaglio off-site	bersaglio on-site	bersaglio off-site
suolo superficiale	---	suolo superficiale	ingestione di suolo	diretta	A e B	---	A e B	---	A	---
	---		contatto dermico	diretta	A e B	---	A e B	---	A	---
	erosione del vento (e dispersione in aria)	aria outdoor	inalazione di polveri outdoor	indiretta	A e B	A e B	A e B	A e B	A	A
	volatilizzazione (e dispersione in aria)		inalazione di vapori outdoor	indiretta	A e B	A e B	A e B	A e B	A	A
	erosione del vento	aria indoor	inalazione di polveri indoor	indiretta	A e B	---	---	---	A	---
	volatilizzazione		inalazione di vapori indoor	indiretta	A e B	---	---	---	A	---
	percolazione nell'insaturo, diluizione in falda (e trasporto in falda)	falda	Rischio per la falda al punto di conformità	---	---	---	---	---	---	---
suolo profondo	volatilizzazione (e dispersione in aria)	aria outdoor	inalazione di vapori outdoor	indiretta	A e B	A e B	A e B	A e B	A	A
		aria indoor	inalazione di vapori indoor	indiretta	A e B	---	---	---	A	---
	percolazione nell'insaturo, diluizione in falda (e trasporto in falda)	falda	Rischio per la falda al punto di conformità	---	---	---	---	---	---	---
falda	---	falda	Rischio per la falda al punto di conformità	---	---	---	---	---	---	---
	volatilizzazione da falda	aria outdoor	inalazione di vapori outdoor da falda	indiretta	A e B	---	A e B	A e B	A	A
		aria indoor	inalazione di vapori indoor da falda	indiretta	A e B	---	---	---	A	---

(*) le modalità di migrazione tra parentesi comportano una esposizione off-site
(**) A = Adulto, B = Bambino

Tabella 34. Elenco delle tipologie di sorgenti di contaminazione, vie di esposizione e bersagli in funzione della destinazione d'uso del suolo ("Criteri metodologici per l'applicazione dell'analisi assoluta di rischio ai siti contaminati" Manuale APAT, revisione 2, 2008).

Da un'analisi della Tabella 34 si evince che gli standard tecnici ad oggi sviluppati non contengono indicazioni circa la valutazione del rischio in relazione alla presenza di sedimenti contaminati all'interno di un sito ubicato in area marina o di transizione. Infatti tali standard tecnici non sono in grado di sintetizzare in indici parametri relativi a: caratteristiche chimiche dei sedimenti, biodisponibilità, biomarker e saggi di tossicità individuati nel modello concettuale adottato in questo lavoro.

Se pur i sedimenti possono rientrare tra le sorgenti secondarie di contaminazione, tuttavia non sono attivabili i percorsi, le modalità di esposizione nonché gli stessi bersagli considerati nel presente lavoro.

Nel modello concettuale dell'area di studio (1° seno del Mar Piccolo) intervengono modalità di migrazione, quali ad esempio il trasporto solido, l'accumulo dei sedimenti ad opera delle correnti e il trasporto solido per deflusso superficiale, non attivabili nei software di analisi di rischio standard e la cui esclusione invaliderebbe l'intero modello concettuale dell'area di studio. Anche le modalità di esposizione considerate nel modello concettuale di questo studio, quali ad esempio la risospensione del sedimento contaminato nella colonna d'acqua o il rilascio dei contaminanti dai sedimenti, non sono contemplate negli standard tecnici ad oggi sviluppati per analisi di rischio conforme al Manuale APAT (rev. 2008).

Infine, anche i bersagli che il modello concettuale dell'area di studio individua, ossia l'ecosistema e i molluschi bivalvi soggetti a bioaccumulo, non sono considerati nei modelli italiani di analisi di rischio.

Per quanto riguarda nello specifico l'analisi di rischio applicata ai sedimenti, sebbene a livello internazionale numerose agenzie e gruppi di lavoro stiano affrontando la tematica, non si dispone ad oggi di un approccio standardizzato e di linee guida ufficiali e condivise. Anche la valutazione della qualità dei sedimenti mediante il cosiddetto approccio Triad, basato sulle tre linee di evidenza chimica, ecotossicologia ed ecologia, risulta di difficile applicazione nel caso specifico in quanto, oltre ad essere funzionale alla valutazione del rischio ecologico ma non sanitario ed ambientale, non prende in considerazione i rischi associati ai diversi interventi di bonifica.

Gli interventi di bonifica che interessano i sedimenti possono infatti alterare in modo significativo, o addirittura distruggere, il delicato equilibrio che sussiste tra habitat acquatico e terrestre e pertanto anche queste conseguenze dovrebbero essere valutate durante la selezione delle alternative di bonifica. Pertanto, l'applicazione dell'analisi di rischio ai sedimenti contaminati dovrebbe comprendere non solo la valutazione dei rischi potenziali legati alla contaminazione del sedimento nello scenario attuale (ante bonifica) e futuro (post bonifica), ma anche la valutazione delle alternative di bonifica in termini di rischio ad esse correlato.

Stante le difficoltà di poter applicare al modello concettuale delineato gli standard tecnici ufficialmente adottati per l'analisi di rischio, è stato dunque scelto, quale strumento utile ai decisori, la valutazione dei rischi associati ai diversi interventi di bonifica applicabili ai sedimenti del Mar Piccolo di Taranto.

7.1. METODOLOGIA

L'approccio metodologico adottato per la valutazione del rischio associato alle diverse opzioni di bonifica parte dalla considerazione generale che un determinato intervento può avere un impatto più o meno elevato sull'ambiente e sulle comunità di un territorio, ma la possibilità di arrecare danno e l'entità di tale danno dipendono dalla presenza di elementi potenzialmente danneggiabili, ciascuno caratterizzato da un certo grado di vulnerabilità a quell'evento.

Ciò si traduce nella espressione formale del concetto di rischio come combinazione di tre fattori, secondo l'equazione:

$$R = P * E * V$$

nella quale:

P indica la Pericolosità, ossia la probabilità di accadimento dell'evento.

E indica l'Esposizione, ossia il valore dell'insieme degli elementi a rischio presenti all'interno dell'area esposta

V indica la Vulnerabilità, ossia la propensione da parte di un bene esposto a subire un danno a seguito di un determinato evento.

Nel caso specifico l'evento corrisponde evidentemente allo scenario, ossia all'intervento di bonifica che si ipotizza di realizzare, e gli elementi esposti corrispondono alle peculiarità ambientali, ecologiche e di carattere sociale del contesto analizzato.

Trattandosi di un'analisi di scenario, alla pericolosità P viene assegnato valore unitario, in quanto si assume la certezza di accadimento dell'evento, corrispondente appunto all'intervento di bonifica. La valutazione del rischio si traduce quindi in una valutazione del danno o impatto, espresso in termini di esposizione e vulnerabilità, potenzialmente associato ad una ipotesi progettuale.

Nei paragrafi seguenti vengono analizzate e descritte con dettaglio le modalità di valutazione dei fattori esposizione e vulnerabilità, che confluiscono poi nella valutazione del rischio.

Il paragrafo 7.2 riporta infine l'applicazione dell'approccio metodologico in via esemplificativa a due aree del 1° seno del Mar Piccolo già individuate dalla Regione Puglia come critiche e prioritarie.

7.1.1. Esposizione

Ogni sito caratterizzato da sedimenti contaminati, e andando più nel dettaglio anche ogni area all'interno di uno stesso sito, presenta una combinazione unica di condizioni e caratteristiche ecologiche e ambientali di cui occorre tenere conto nei processi di gestione del rischio.

In particolare la complessità del sistema ambientale Mar Piccolo, come ampiamente emerso a seguito degli approfondimenti scientifici effettuati nell'ambito delle diverse attività tematiche previste in Convenzione, implica la necessità di considerare in maniera integrata numerosi aspetti afferenti a diverse aree tematiche, i quali interagiscono tra loro con relazioni complesse.

In quest'ottica l'esposizione, intesa come valore esposto al rischio, viene individuata non mediante un unico indicatore ma attraverso una serie di "componenti" (ambientali, ecologiche e di valenza sociale) che possono essere influenzate positivamente o negativamente dagli interventi di messa in sicurezza e/o bonifica.

La definizione stessa di esposizione mette in evidenza come essa dipende dalle caratteristiche intrinseche del sito; ne descrive cioè le peculiarità allo stato attuale, prima della realizzazione di qualsiasi intervento.

La prima fase di analisi è consistita pertanto in un'attività di screening finalizzata ad individuare, utilizzando in input il modello concettuale e tutti gli elementi conoscitivi descritti nel quadro ambientale, gli aspetti che, con riferimento alle caratteristiche sito-specifiche del 1° seno del Mar Piccolo, possono avere valenza nel processo di valutazione del rischio.

Le componenti individuate afferiscono alle seguenti aree tematiche:

- Sedimenti
- Risorsa idrica
- Ecosistema
- Biodisponibilità contaminante
- Morfologia
- Idrogeologia
- Idrodinamica
- Criticità dei materiali
- Fruizione e destinazione d'uso dell'area
- Tempistica

Per poter giungere a delle valutazioni il più possibile oggettive e condivise, ciascuna componente viene esaminata sulla base di alcuni "indicatori" di riferimento, anch'essi individuati in base alle risultanze del quadro ambientale sito-specifico oltre che sulle indicazioni riportate nella bibliografia internazionale.

In Tabella 35 vengono elencati le componenti e i relativi indicatori. L'ultima colonna riporta il riferimento alle attività di approfondimento scientifico utilizzate per l'elaborazione delle valutazioni.

COMPONENTE	INDICATORI	ATTIVITA' DI APPROFONDIMENTO PER L'ELABORAZIONE DEL MCS
SEDIMENTI		
Caratterizzazione chimica	Grado ed estensione areale della contaminazione	Caratterizzazioni ICRAM Attività 5 – URL CONISMA Milano-Bicocca (Prof. Corselli) Attività 7 – URL CONISMA (Prof. Mastronuzzi) Attività 13 – DICATEch (Prof. Federico) Attività 14 – DICATEch (Prof.ssa Cotecchia)
	Numero di campioni oltre soglia / fascia di profondità	
	Concentrazione di metalli nella frazione pelitica (<63µm)	
Caratteristiche geochemiche	Capacità di scambio ionico (C.S.C.in meq/100g) e cationi scambiabili	
Caratteristiche mineralogiche	% peso di fasi minerali	
Caratteristiche ecotossicologiche	Saggi ecotossicologici	
Caratteristiche geotecniche, granulometria e tessitura	Grado di consolidamento	
	Limiti di Atterberg (ritiro, plasticità, liquidità)	
	Peso dell'unità di volume, del contenuto d'acqua e dell'indice dei vuoti	
	Frazioni granulometriche	
RISORSA IDRICA		
Stato chimico (Qualità dell'acqua - Direttiva 2000/60) e batteriologico	Numero di campioni oltre soglia	Attività 8 – C.N.R.-I.R.P.I. Bari (Dott. Polemio) Attività 10 – ARPA Puglia
	Classificazione dello stato chimico	
	Contenuto di nutrienti	
	Batteria di saggi biologici	
Stato fisico	% torbidità	
	Portata massica in [kg/s] di materiale risospeso	
	Concentrazioni dei sedimenti mediate sulla verticale in [kg/m3]	
	% (o contenuto) Solidi sospesi / m3 liquido campionato	
	Temperatura, Salinità, Densità, Fluorescenza, Ossigeno disciolto, pH, Trasparenza	
ECOSISTEMA		
Presenza habitat di valore/modifiche habitat	Presenza di biocenosi (si / no)	Attività 6 – URL CONISMA (Prof. Tursi – Dott. Mastrototaro)
	Presenza di macroalghe nitrofile e organismi filtratori	
	Presenza di specie protette	
Flora, fauna e biodiversità, con particolare riferimento alle comunità bentoniche	Analisi della struttura delle comunità bentoniche (calcolo degli indici strutturali) e individuazione delle specie sensibili	
	Numero di specie a rischio	
BIODISPONIBILITA' CONTAMINANTE		
Biodisponibilità dei contaminanti e bioaccumulo, con particolare riferimento ai fenomeni di bioaccumulo nei mitili	Bioaccumulo di contaminanti organici e inorganici	Attività 12 – C.N.R.-I.A.M.C. Taranto (Dott. Cardellicchio)
	Analisi di biomarkers (es. alterazioni fisiologiche, alterazioni del sistema antiossidante, danno al DNA)	
Mobilità inquinante all'interfaccia acqua/sedimento	Indice di rilascio dei contaminanti da sedimenti nella colonna d'acqua	
	Risospensione dei sedimenti che favoriscono la mobilità e la biodisponibilità di molte specie chimiche	
	Bioaccumulo di metalli pesanti a seguito di risospensione	
	Potenziale redox	
MORFOLOGIA E BATIMETRIA		
Assetto e alterazioni morfologiche e batimetriche del fondale	Rilievo batimetrico	Attività 5 – URL CONISMA Milano-Bicocca (Prof. Corselli) Attività 7 – URL CONISMA (Prof.
	Anomalie nel rilievo batimetrico	

	Dinamiche di risalita di acqua in pressione dal substrato	Mastronuzzi) Attività 9 – DICATEch (prof. Mossa)
	Distribuzione areale dei sedimenti	
	Eventuali fenomeni di instabilità	
IDROGEOLOGIA		
Compatibilità con condizioni idrogeologiche sito-specifiche	Presenza di citri / unità di superficie	Attività 6 – URL CONISMA (Prof. Tursi – Dott. Mastrototaro) Attività 7 – URL CONISMA (Prof. Mastronuzzi) Attività 8 – C.N.R.-I.R.P.I. Bari (Dott. Polemio) Attività 10 – ARPA Puglia (DAP Taranto) Attività 11 - C.N.R.-I.A.M.C. (Dott. Cardellicchio)
	Portata idrica citri	
	Eventuale interconnessione idraulica tra falda superficiale e falda profonda	
IDRODINAMICA		
Dinamiche di trasporto sedimenti	Topografia della linea di costa	Attività 1 – C.N.R.-I.R.S.A. (Dott. Uricchio) Attività 2, 3, 4 – DICATEch (Prof. Fratino) Attività 7 – URL CONISMA (Prof. Mastronuzzi) Attività 9 – DICATEch (prof. Mossa) Attività 11- C.N.R.-I.A.M.C. (Dott. Cardellicchio)
	Ridistribuzione dei sedimenti sui fondali	
	Presenza di afflussi da reticolo superficiale	
Correnti e maree	Andamento delle correnti in sezioni longitudinali significative	
	Velocità e direzioni predominanti	
	Variazioni stagionali delle correnti	
	Oscillazioni del moto ondoso	
	Fluttuazione di salinità e temperatura	
	Batimetria	
Attività antropiche	Presenza di forzanti antropiche (scarichi, prelievi)	
CRITICITA' DEI MATERIALI		
Materiali da gestire	Quantità di materiale contaminato	Caratterizzazioni condotte dal Commissario Delegato per l'emergenza rifiuti in Puglia e dal Commissario Delegato per l'Emergenza ambientale in Puglia
FRUIZIONE DELL'AREA E DESTINAZIONE D'USO		
Integrazione con ambiente e comunità	Attività di mitilicoltura	Attività 6 – URL CONISMA (Prof. Tursi – Dott. Mastrototaro)
	Aree adibite alla navigazione	
	Attività portuali/militari	
	Attività ricreative	
	Futura destinazione d'uso dell'area	
TEMPISTICA		
Tempi di decontaminazione/bonifica	Tempi stimati di abbassamento dei livelli di contaminazione/raggiungimento degli obiettivi di bonifica	

Tabella 35. Componenti e indicatori.

A ciascuna componente, e quando possibile a ciascun indicatore, viene associato un livello di esposizione basato su criteri di presenza/assenza classificato qualitativamente e, per immediatezza visiva anche cromaticamente, in:

- **Alto** (3) – per presenza di elementi di elevato valore/complessità (es. caratteristiche dell'ecosistema, caratteristiche idrogeologiche), o per sussistenza di condizioni di elevata criticità (es. stato di contaminazione dei sedimenti).
- **Medio** (2) – per presenza di elementi di medio valore/complessità (es. caratteristiche dell'ecosistema, caratteristiche idrogeologiche), o per sussistenza di condizioni di moderata criticità (es. stato di contaminazione dei sedimenti).

- **Basso** (1) – per assenza di elementi di particolare valore/complessità (es. caratteristiche dell'ecosistema, caratteristiche idrogeologiche), o per assenza di condizioni di criticità (es. stato di contaminazione dei sedimenti).

Il livello di esposizione esprime l'attitudine della specifica componente a subire danno o a permanere nella eventuale condizione di criticità e viene attribuito sulla base della minore o maggiore presenza di elementi esposti al rischio nell'area analizzata.

Alle tre classi qualitative di esposizione è assegnata anche una scala di valori numerici (1, 2, 3). Si precisa che si tratta di valori puramente convenzionali, non riferiti a grandezze misurabili, e finalizzati esclusivamente a rendere quantitativamente confrontabili i dati eterogenei e/o qualitativi che concorrono alla valutazione del rischio.

7.1.2. Vulnerabilità

Atteso che tutte le tecnologie di bonifica per sedimenti contaminati hanno dei vantaggi e degli svantaggi se applicate ad uno specifico sito, qualsiasi processo decisionale riguardante la scelta di un approccio di intervento dovrebbe essere basata sul bilanciamento dei compromessi e sulla minimizzazione degli impatti negativi delle alternative. Ai fini di una corretta valutazione e gestione del rischio, è quindi indispensabile che tali vantaggi e svantaggi siano attentamente identificati.

La vulnerabilità, definita come propensione di una determinata componente ad essere danneggiata dall'intervento di bonifica, introduce nel processo di valutazione l'analisi delle tipologie di intervento e la loro applicabilità al contesto sito-specifico.

L'analisi qui presentata viene svolta con riferimento ai tre scenari tipo già descritti nel Capitolo 6:

- Attenuazione Naturale Assistita
- Dragaggio
- Capping

e in funzione delle stesse componenti sito-specifiche precedentemente individuate.

A ciascuna componente, in ciascuno dei tre scenari di intervento ipotizzati, viene associato un livello di vulnerabilità, basato su considerazioni di impatto, classificato qualitativamente, e per immediatezza visiva anche cromaticamente, in:

- **Alto** (3) – se l'intervento ha impatti negativi rilevanti sulla componente analizzata.
- **Medio** (2) – se l'intervento produce impatti negativi di media entità sulla componente analizzata.
- **Basso** (1) – se l'intervento ha impatti negativi nulli o comunque trascurabili sulla componente analizzata.

Anche in questo caso, alle tre classi qualitative di vulnerabilità corrisponde la scala di valori numerici 1, 2, 3, anch'essi convenzionali, non riferiti a grandezze misurabili, e finalizzati esclusivamente a rendere quantitativamente confrontabili dati eterogenei e/o qualitativi.

La vulnerabilità esprime una stima della frazione di valore esposto che potrebbe essere persa o danneggiata a causa di uno specifico evento; è quindi una misura della fragilità, della impossibilità di resistere ad un evento da parte di un elemento, in funzione sia delle proprie caratteristiche intrinseche che delle caratteristiche dell'evento.

Il livello di vulnerabilità viene attribuito sulla base dell'impatto che ciascun intervento ha sulla specifica componente, utilizzando come base conoscitiva dati bibliografici, giudizi esperti consolidati e le simulazioni di scenario sito-specifiche descritte nel Capitolo 6.

È opportuno rimarcare che l'analisi svolta fa riferimento a degli scenari esemplificativi dei tre principali approcci generalmente utilizzati per la bonifica di sedimenti contaminati, e non esaustivi delle possibili ipotesi di intervento, le quali comprendono anche molteplici soluzioni derivanti dalla combinazione di più tecniche.

Si tratta di “scenari tipo” nei quali, in accordo con la finalità esemplificativa dell’approccio proposto, non ci si sofferma su elementi tecnici e progettuali di dettaglio, ma piuttosto sulla possibile risposta del sistema Mar Piccolo (e in particolare del 1° seno) a diverse tipologie di intervento. Un maggiore livello tecnico di dettaglio potrà essere raggiunto solo in sede di definizione del progetto per la specifica area di intervento. Occorre inoltre ribadire alcuni elementi che devono essere intesi come principi fondamentali per la gestione del rischio nei sedimenti contaminati e pertanto imprescindibili ai fini dell’efficacia di qualunque ipotesi di intervento.

In primo luogo qualsiasi scenario deve presupporre il controllo delle fonti attive di contaminazione attuali (vettore acqua e sedimento) e/o storiche (sedimento), dove per controllo delle fonti si intende l’insieme degli interventi volti ad interrompere, contenere o mitigare il rilascio dei contaminanti verso il recettore in esame.

Inoltre tutti gli scenari devono prevedere un estensivo piano di monitoraggio finalizzato a verificare l’efficacia dell’intervento, l’assenza di effetti negativi sull’ambiente circostante e l’efficienza delle misure di mitigazione scelte.

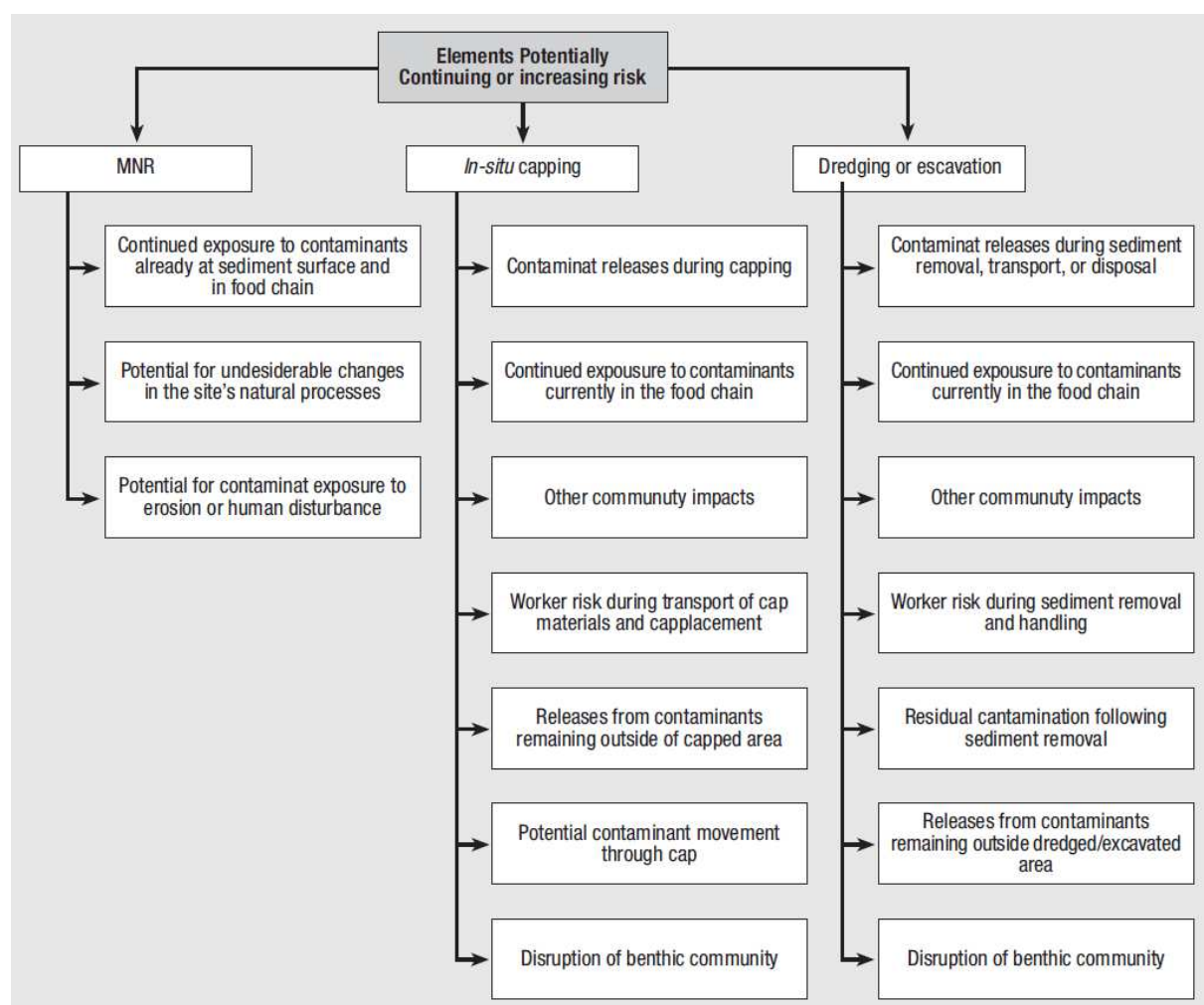


Figura 146. Elementi che potenzialmente contribuiscono ad incrementare il rischio nelle diverse opzioni di bonifica (“Contaminated Sediment Remediation Guidance for Hazardous Waste Sites” EPA, 2005).

7.1.3. Rischio

Alla valutazione del livello di rischio si giunge combinando le precedenti stime dei livelli di esposizione e vulnerabilità, secondo l'equazione del rischio precedentemente descritta.

In particolare, conservando l'approccio multidisciplinare per componenti, la metodica consente di determinare per ciascuna componente, in ciascuno dei tre scenari ipotizzati, un livello di rischio corrispondente alla seguente classificazione quali/quantitativa:

- Rischio trascurabile
- Rischio molto basso
- Rischio basso
- Rischio medio
- Rischio alto
- Rischio molto alto.

Il risultato viene restituito mediante una rappresentazione tabellare componenti-scenari nella quale, per maggiore immediatezza visiva, i livelli di rischio vengono anche rappresentati tramite la seguente scala cromatica:

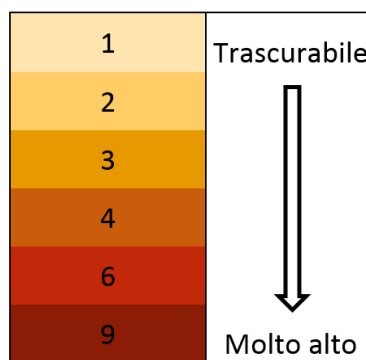


Figura 147. Classificazione quali-quantitativa dei rischi.

Scopo della metodica è mettere a sistema e valutare con un approccio unitario dati multidisciplinari ed eterogenei e fornire un quadro sinottico delle possibili conseguenze derivanti dall'applicazione di un certo intervento ad una determinata area.

La metodologia proposta non deve essere intesa come strumento di scelta dell'intervento derivante dalla mera sommatoria dei livelli di rischio associati a ciascuna componente, ma piuttosto come strumento di supporto ad un processo decisionale più articolato ed integrato. L'utilizzo del valore somma sarebbe infatti metodologicamente scorretto dato il carattere puramente convenzionale dei valori numerici ottenuti, oltre che semplicistico in relazione alla multidisciplinarietà del sistema ambientale in studio e alle relazioni complesse che intercorrono tra le componenti.

La metodologia va invece intesa come strumento utile ad identificare le criticità in relazione alle caratteristiche sito-specifiche e a calibrare in maniera ottimale l'intervento/i in funzione dei livelli di rischio individuati, in linea con le indicazioni dell'*Environmental Protection Agency* secondo cui la valutazione del rischio dovrebbe fornire una base utile a confrontare, classificare e stabilire una scala di priorità dei rischi ("*Ecological Risk Assessment Guidance for Superfund: Process for Designing and Conducting Ecological Risk Assessment*"). È possibile con un'analisi di questo tipo indirizzare la fase progettuale verso un intervento che minimizzi i livelli di rischio riconosciuti come più critici per il sito specifico.

7.2. APPLICAZIONE AL 1° SENO DEL MAR PICCOLO

L'approccio metodologico è stato applicato, in prima analisi, a due differenti aree situate all'interno del 1° seno e già identificate dalla Regione Puglia (Area politiche per l'ambiente, le reti e la qualità urbana; Servizio Ciclo dei Rifiuti e Bonifica) come sorgenti secondarie di contaminazione da PCB ("Contaminazione da policlorobifenili (PCB) nel Mar Piccolo di Taranto", RSU/COM/2011/00002).

Le due aree a mare si trovano una in corrispondenza dell'arsenale militare, nell'area di caratterizzazione denominata "area 170 ha", e una nella zona a nord-est del 1° seno, a circa 200 m ad ovest della penisola di Punta Penna (Figura 148).

Trattandosi di aree relativamente puntuali, per la descrizione delle stesse sono stati utilizzati i dati di caratterizzazione ambientale disponibili per la specifica area e/o per le aree ad esse limitrofe.

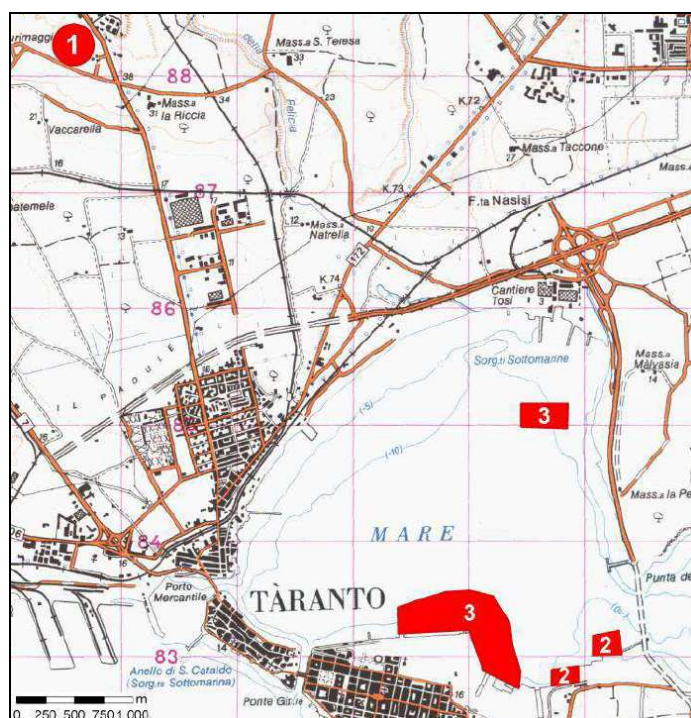


Figura 148. Aree contaminate da PCB nel SIN di Taranto: 1) area PIP del Comune di Statte; 2) arsenale militare (aree a terra); 3) aree a mare ("Contaminazione da policlorobifenili (PCB) nel Mar Piccolo di Taranto", Regione Puglia, RSU/COM/2011/00002).

L' "Area 170 ha" occupa tutta la fascia a sud del 1° seno del Mar Piccolo prospiciente l'arsenale della Marina Militare, tra il ponte Punta Penna e il canale navigabile, ed è estesa verso il largo per circa 900 m. Le attività di caratterizzazione di questa porzione del 1° seno sono state svolte nel 2005 da parte del Commissario Delegato per l'emergenza rifiuti in Puglia.

La sorgente secondaria di contaminazione identificata come "area nord-est" ha invece un'estensione di circa 10 ha ed è stata individuata sulla base dei risultati delle attività di caratterizzazione dei lotti Mar Grande Il lotto e Mar Piccolo eseguite nel 2010 dal Commissario Delegato per l'Emergenza Ambientale in Puglia.

La priorità d'intervento attribuita a queste due aree, contaminate in particolare da policlorobifenili, trova motivazione nella riscontrata contaminazione da parte degli stessi inquinanti nei mitili allevati nel 1° Seno del Mar Piccolo e destinati al consumo umano, elemento di particolare criticità in relazione alle peculiarità socio-economiche del territorio tarantino.

In considerazione della rilevanza ambientale e socio-economica rappresentata dalla contaminazione da PCB riscontrata nei mitili, ai fini della presente valutazione del rischio, su mandato del Commissario Straordinario per gli interventi urgenti di bonifica, i bersagli sono identificati esattamente nei mitili.

Come fin qui descritto, la valutazione del rischio si esplica attraverso tre tabelle in cui vengono riportati i livelli di esposizione, vulnerabilità e infine rischio associati a ciascuna componente nella specifica area.

Nei paragrafi seguenti vengono presentati i risultati dell'applicazione sia all' "Area 170 ha" sia all' "area nord-est" dell'approccio metodologico proposto per valutazione del rischio. I risultati vengono riportati in forma tabellare, sulla base delle classificazioni descritte nel paragrafo 7.1. Per ciascuna componente vengono riportate in maniera sintetica le argomentazioni alla base delle valutazioni, atteso che la trattazione più dettagliata di ciascun aspetto è stata già affrontata nei Capitoli dedicati alla descrizione del quadro ambientale e del modello concettuale sito specifico. Per ulteriori approfondimenti si rimanda alle singole relazioni tematiche allegate al presente documento.

7.2.1. Esposizione

Area 170 ha

La Tabella 36 riporta la valutazione dei livelli di esposizione per l'area 170 ha, cui segue una sintetica descrizione delle scelte effettuate.

COMPONENTI	ESPOSIZIONE
	Area 170 ha
SEDIMENTI	3
RISORSA IDRICA	2
ECOSISTEMA	1
BIODISPONIBILITA' CONTAMINANTE	3
MORFOLOGIA	2
IDROGEOLOGIA	1
IDRODINAMICA	1
CRITICITA' DEI MATERIALI	3
FRUIZIONE DELL'AREA E DESTINAZIONE D'USO	3
TEMPISTICA	3

LEGENDA

1	Basso
2	Medio
3	Alto

Tabella 36. Livelli di esposizione per l'Area 170 ha.

Sedimenti: attribuzione di livello di esposizione alto in considerazione del grado e dell'estensione della contaminazione rilevata: contaminazione riscontrata anche a profondità considerevoli (presenza di PCB in concentrazioni superiori ai valori di intervento fino a 3 m di profondità). Lo stato di contaminazione dei sedimenti determina pertanto, in considerazione anche delle caratteristiche granulometriche dei sedimenti, la sussistenza di una situazione di elevata criticità.

Risorsa idrica: attribuzione di livello di esposizione medio sulla base principalmente dei risultati delle analisi svolte sulla matrice acqua le quali, sebbene abbiano rilevato la presenza di alcuni contaminanti, con qualche hot spot, in generale non delineano una situazione di particolare criticità, date le concentrazioni medio-basse, in particolare con riferimento al parametro PCB.

Ecosistema: attribuzione di livello di esposizione basso dal momento che le attività conoscitive svolte hanno messo in evidenza lo scarso valore dell'area in termini di flora, fauna e biodiversità e in particolare in riferimento alle comunità bentoniche: la mappatura biocenotica indica, nelle immediate vicinanze dell'area in esame, la presenza di fondale sabbioso-fangoso privo di copertura algale o con scarsa copertura algale,

caratteristiche attribuibili anche all'area oggetto d'analisi, come confermato dalla videoispezione diretta dei fondali.

Biodisponibilità contaminante: attribuzione di livello di esposizione alto sulla base delle evidenze di fenomeni di bioaccumulo di PCB nei mitili destinati al consumo umano, confermate dagli esperimenti di risospensione e rilascio di contaminanti svolti in sito e in laboratorio.

Morfologia: attribuzione di livello di esposizione medio in quanto i rilievi batimetrici hanno messo in evidenza la presenza di alcune anomalie del fondale, attribuibili alle attività di ancoraggio; la presenza di questi elementi di disturbo del fondale va considerata nella valutazione dei livelli di esposizione, in quanto elemento caratterizzante il sito rispetto a una condizione indisturbata.

Idrogeologia: attribuzione di livello di esposizione medio in quanto occorre tenere conto delle peculiarità del bacino, caratterizzato da un precario equilibrio strettamente collegato alla geologia e all'idrogeologia del substrato, ma allo stato attuale non esistono dirette evidenze di fenomeni di risalita di acqua in pressione nella specifica area e nelle zone limitrofe.

Idrodinamica: attribuzione di livello di esposizione basso sulla base dei risultati degli studi correntometrici e delle simulazioni relative alle aree di accumulo ed erosione in condizioni indisturbate: probabilmente in virtù della posizione "riparata" rispetto alla zona di influenza del canale navigabile e delle altre principali forzanti antropiche e naturali del sistema, l'area 170 ha risulta essere, a prescindere dalla stagione e dalle condizioni di marea, una zona non interessata da evidenti fenomeni di erosione e accumulo e poco influenzata dai flussi di circolazione marina. Non si rilevano pertanto specifici elementi di peculiarità o complessità da considerare nella valutazione dell'esposizione.

Criticità dei materiali: attribuzione di livello di esposizione alto in relazione alle inevitabili criticità gestionali e operative che una grande mole di materiale contaminato da gestire/controllare comporta, data la superficie dell'area interessata.

Fruizione dell'area e destinazione d'uso: attribuzione di livello di esposizione alto in quanto l'attuale stato di contaminazione del sito implica limitazioni d'uso dell'area e divieti di allevamento e commercializzazione che impattano in modo considerevole sul tessuto sociale del territorio.

Tempistica: attribuzione di livello di esposizione alto dal momento che lo stato del sito e la tipologia di contaminazione comporterebbe la permanenza della situazione di criticità per tempi molto lunghi: in prima approssimazione è stimabile che la decontaminazione naturale del sistema, in assenza di qualsiasi tipologia di intervento e/o controllo, richiederebbe diverse centinaia di anni.

Area nord-est

La Tabella 37 riporta la valutazione dei livelli di esposizione per l'area nord-est, cui segue una sintetica descrizione delle scelte effettuate.

COMPONENTI	ESPOSIZIONE
	Area nord-est
SEDIMENTI	2
RISORSA IDRICA	3
ECOSISTEMA	3
BIODISPONIBILITA' CONTAMINANTE	3
MORFOLOGIA	3
IDROGEOLOGIA	3
IDRODINAMICA	2
CRITICITA' DEI MATERIALI	1
FRUIZIONE DELL'AREA E DESTINAZIONE D'USO	3
TEMPISTICA	3

LEGENDA

1	Basso
2	Medio
3	Alto

Tabella 37. Livelli di esposizione per l'area nord-est.

Sedimenti: attribuzione di livello di esposizione medio in considerazione del grado e dell'estensione della contaminazione rilevata: contaminazione estesa su un'area relativamente ridotta (circa 10 ha) e riscontrata nei primi 50 cm di profondità.

Risorsa idrica: attribuzione di livello di esposizione alto in quanto i risultati delle analisi sui campioni d'acqua prelevati nell'area nord-est del 1° seno hanno messo in evidenza la presenza di concentrazioni relativamente alte per diversi parametri, con l'identificazione di alcuni punti critici in particolare in prossimità dei principali apporti di acque di origine terrigena (superficiali e di falda).

Ecosistema: attribuzione di livello di esposizione alto in quanto, come si evince dalla mappatura biocenotica, la zona nord-est del 1° seno è caratterizzata da un'elevata biodiversità, sia vegetale sia animale, con presenza anche di alcune specie sottoposte a regime di protezione per la loro valenza naturalistica e ambientale.

Biodisponibilità contaminante: attribuzione di livello di esposizione alto sulla base delle evidenze di fenomeni di bioaccumulo di PCB nei mitili destinati al consumo umano, confermate dagli esperimenti di risospensione e rilascio di contaminanti svolti in sito e in laboratorio.

Morfologia: attribuzione di livello di esposizione alto in considerazione della peculiare configurazione e complessità del fondale, caratterizzato da depressioni, correlate sia ad attività antropiche che alla presenza dei "citri". I versanti di tali depressioni, che raggiungono ordini di grandezza anche superiori ai 10 m, sono soggetti a fenomeni di instabilità che possono portare anche all'attivazione di movimenti gravitativi.

Idrogeologia: attribuzione di livello di esposizione alto in quanto esistono chiare evidenze dell'elevata dinamicità dei fenomeni di risalita di acqua in pressione nella zona nord-est del 1° seno. Oltre ai citri già censiti, ci sono inoltre elementi che portano a considerare anche la possibilità che il carico idrostatico delle acque sotterranee possa aprire nuove vie di flusso.

Idrodinamica: attribuzione di livello di esposizione medio in quanto la zona nord-est del 1° seno è parzialmente interessata, in particolare nella fascia costiera, da intensi flussi caratterizzati anche da strutture vorticosi locali. Si tratta inoltre della zona di recapito del deflusso idrico superficiale proveniente dal principale bacino scolante dell'area vasta, situato a nord del 1° seno.

Anche le simulazioni sul trasporto solido e sulle aree di accumulo/erosione in condizioni indisturbate mostrano come l'area sia soggetta, sia in stagione estiva che invernale, ad una certa ridistribuzione dei sedimenti. In particolare nella simulazione con granulometria argillosa in stagione invernale si ottengono in output modificazioni del fondale anche dell'ordine di 10 cm.

Criticità dei materiali: attribuzione di livello di esposizione medio in quanto, sebbene esistano delle criticità legate alla presenza e quindi alla necessità di gestire sedimenti contaminati, si tratta di volumetrie ipoteticamente limitate.

Fruizione dell'area e destinazione d'uso: attribuzione di livello di esposizione alto in quanto l'attuale stato di contaminazione del sito implica limitazioni d'uso dell'area e divieti di allevamento e commercializzazione dei mitili che impattano in modo considerevole sul tessuto sociale del territorio.

Tempistica: attribuzione di livello di esposizione alto dal momento che lo stato del sito e la tipologia di contaminazione comporterebbe la permanenza della situazione di criticità per tempi molto lunghi: in prima approssimazione è stimabile che la decontaminazione naturale del sistema, in assenza di qualsiasi tipologia di intervento e/o controllo, richiederebbe diverse centinaia di anni.

7.2.2. Vulnerabilità

La Tabella 38 riporta la valutazione della vulnerabilità, effettuata sulla base della bibliografia e delle considerazioni già sintetizzate nel paragrafo 7.1.2.

COMPONENTI	VULNERABILITA'		
	ATTENUAZIONE NATURALE ASSISTITA	DRAGAGGIO	CAPPING
SEDIMENTI	3	1	2
RISORSA IDRICA	1	3	2
ECOSISTEMA	2	3	3
BIODISPONIBILITA' CONTAMINANTE	2	2	1
MORFOLOGIA	1	3	2
IDROGEOLOGIA	1	3	3
IDRODINAMICA	1	2	2
CRITICITA' DEI MATERIALI	1	3	2
FRUIZIONE DELL'AREA E DESTINAZIONE D'USO	2	1	1
TEMPISTICA	3	1	1

LEGENDA

1	Basso
2	Medio
3	Alto

Tabella 38. Livelli di vulnerabilità.

7.2.3. Rischio

La Tabella 39 e la Tabella 40 riportano la valutazione dei livelli di rischio risultanti dall'applicazione dell'equazione del rischio $R = P * E * V$ per le due aree analizzate.

COMPONENTI	RISCHIO Area 170 ha		
	ATTENUAZIONE NATURALE ASSISTITA	DRAGAGGIO	CAPPING
SEDIMENTI	9	3	6
RISORSA IDRICA	2	6	4
ECOSISTEMA	2	3	3
BIODISPONIBILITA' CONTAMINANTE	6	6	3
MORFOLOGIA	2	6	4
IDROGEOLOGIA	1	3	3
IDRODINAMICA	1	2	2
CRITICITA' DEI MATERIALI	3	9	6
FRUIZIONE DELL'AREA E DESTINAZIONE D'USO	6	3	3
TEMPISTICA	9	3	3

1 Trascurabile

2

3

4

6

9 Molto alto

Tabella 39. Livelli di rischio per l'Area 170 ha.

COMPONENTI	RISCHIO Area nord-est		
	ATTENUAZIONE NATURALE ASSISTITA	DRAGAGGIO	CAPPING
SEDIMENTI	6	2	4
RISORSA IDRICA	3	9	6
ECOSISTEMA	6	9	9
BIODISPONIBILITA' CONTAMINANTE	6	6	3
MORFOLOGIA	3	9	6
IDROGEOLOGIA	3	9	9
IDRODINAMICA	2	4	4
CRITICITA' DEI MATERIALI	1	3	2
FRUIZIONE DELL'AREA E DESTINAZIONE D'USO	6	3	3
TEMPISTICA	9	3	3

1 Trascurabile

2

3

4

6

9 Molto alto

Tabella 40. Livelli di rischio per l'area nord-est.

7.3. PROBLEMATICHE EMERGENTI

La valutazione del rischio condotta mediante l'approccio metodologico descritto si configura come un pratico strumento di supporto alle decisioni, in base al quale valutare e orientare le possibili opzioni di messa in sicurezza e/o bonifica.

Partendo dal presupposto che sarebbe metodologicamente scorretto, in virtù delle relazioni complesse che intercorrono tra le componenti analizzate, sintetizzare il rischio nella sommatoria di valori quantitativi del

tutto convenzionali, la scelta di idonee soluzioni di bonifica, MIS, attenuazione assistita e gestione deve essere fatta considerando in maniera organica tutti gli aspetti esaminati.

Le componenti del rischio sono infatti il più delle volte ineliminabili, ma possono essere ridotte contemplando opportuni interventi di prevenzione e mitigazione, e progettando opportunamente l'intervento.

La metodologia permette di avere una conoscenza di dettaglio delle componenti che generano rischio e anche di discretizzare, a parità di livello di rischio, se esso è maggiormente legato alla tipologia di intervento di bonifica, o se è dovuto alle caratteristiche intrinseche del sistema, in modo da poter calibrare opportunamente la tipologia e l'entità dell'intervento.

Nella prima ipotesi si potrà agire sugli aspetti progettuali, sia in termini di scelta della migliore tecnologia o della migliore combinazione tra diversi approcci di bonifica, sia mediante opportuni accorgimenti e misure di mitigazione, in modo da abbassare i livelli di rischio.

Laddove il rischio è generato principalmente dall'esposizione, potranno essere effettuate indagini di dettaglio sulla precisa area oggetto di intervento, focalizzate sullo specifico aspetto tematico che presenta i più alti livelli di criticità.

Si evidenzia che le valutazioni proposte hanno la valenza di approccio esemplificativo: esse sono riferite alle sole due aree considerate, si basano sul quadro conoscitivo attualmente noto e si riferiscono ai tre generici scenari tipo generalmente utilizzati per bonifica di sedimenti contaminati. Valutazioni di dettaglio potranno essere effettuate in riferimento a ciascuno specifico progetto di intervento, derivante anche dalla combinazione di più tecniche.

Si ribadisce inoltre che l'identificazione e il controllo delle sorgenti di contaminazione, così come un esteso piano di monitoraggio, rappresentano due fasi nodali indispensabili ai fini dell'efficacia di tutto il processo di risanamento.

Ogni decisione che riguarda la scelta di uno specifico intervento di bonifica per un sito contaminato dovrebbe essere basata sulla considerazione complessiva dei vantaggi e delle limitazioni degli approcci disponibili e sul bilancio dei compromessi tra le varie alternative, pur nella consapevolezza e con l'intento di pervenire ad un'effettiva riduzione del rischio per la salute umana e per l'ambiente.

L'elemento nodale per la selezione dell'intervento di bonifica deve tendere a selezionare l'alternativa che meglio di altre garantisce la riduzione complessiva del rischio, in termini di risultati attesi con riguardo sia alle caratteristiche intrinseche del sito sia alla specifica tecnologia di bonifica. Infatti tutte le tecniche di bonifica hanno vantaggi e svantaggi con risultati anche molto diversi a seconda che siano applicate ad un particolare sito. Questo elemento è particolarmente critico nella gestione del rischio, per cui diventa un fattore problematico se non è stato correttamente identificato e valutato a priori.

Per esempio, la gestione del rischio dei sedimenti contaminati nell'ambiente acquatico potrebbe produrre ulteriori rischi a danno sia dell'ambiente acquatico che di quello terrestre. Come anche la rimozione di materiali contaminati, se da un lato libera gli ecosistemi dai fattori primari di rischio può dall'altro produrre una rimobilizzazione dei contaminanti con l'effetto di generare rischi aggiuntivi per la salute e per l'ambiente.

Di conseguenza, le decisioni da assumere nella gestione del rischio derivante dalla presenza di sedimenti contaminati devono essere basate sui rischi relativi connessi all'applicazione delle diverse alternative di intervento, perché in aggiunta ai rischi specifici (associati all'esposizione dell'ambiente e dell'uomo ai contaminanti) sia tenuto in debita considerazione il rischio complessivo (generato dall'implementazione delle tecniche di bonifica).

La "valutazione del rischio" (*risk assessment*) costituisce una delle componenti del processo complessivo di analisi del rischio, che comprende anche la "gestione del rischio" (*risk management*) e la comunicazione del rischio. Mentre la valutazione del rischio riguarda l'individuazione, la descrizione e la stima dei rischi, e coinvolge competenze tecnico-scientifiche afferenti a diverse aree disciplinari, la gestione del rischio è propria dei soggetti decisori: affinché la metodologia di quantificazione del rischio sia uno strumento utile alla fase di *risk management*, è indispensabile definire i criteri per stabilire dei criteri di accettabilità, cosa

che può essere fatta solo una volta definiti gli obiettivi di bonifica **in funzione della specifica destinazione d'uso del sito**. Qualsiasi decisione riguardo la scelta del possibile intervento non può pertanto prescindere dalla definizione degli obiettivi di bonifica.

In quest'ottica, l'approccio metodologico proposto si presta anche ad un ulteriore livello di dettaglio e classificazione dei rischi: i decisori possono, in funzione degli obiettivi di bonifica e della destinazione d'uso del sito, stabilire una rilevanza differenziata alle varie componenti e assegnare ad esse un differente "peso" o ordine di priorità nella valutazione dei rischi. Tale aspetto può avere valenza strategica nella scelta degli interventi e nella calibrazione degli stessi in funzione di un uso ottimale delle risorse.

8. SINTESI DEL DOCUMENTO

Il lavoro complessivo è stato finalizzato alla progettazione e lo svolgimento di una serie di attività di studio e ricerca che avessero come obiettivo quello di completare, integrare e, in alcuni casi, aggiornare il quadro ambientale ed ecologico del Mar Piccolo di Taranto. A loro volta, le informazioni sono state acquisite per permettere una migliore comprensione dell'evoluzione e delle dinamiche della contaminazione riscontrata nel bacino, in modo particolare legata alla presenza conclamata nel 1° seno di concentrazioni critiche nei sedimenti di microinquinanti organici (tra cui i PCB) ed inorganici (metalli pesanti), così da poter ipotizzare gli opportuni interventi di bonifica (inclusa la messa in sicurezza) degli stessi.

I risultati così ottenuti hanno consentito la definizione di un modello concettuale sito-specifico, che nella fattispecie ha dimostrato ancora di più l'assoluta peculiarità e complessità del sistema-Mar Piccolo; di seguito sono sintetizzati alcuni aspetti di tale sistema, così come descritti dalle attività di studio e ricerca svolte.

Dal punto di vista della geologia e della geomorfologia del Mar Piccolo, una rappresentazione aggiornata della morfologia e stratigrafia del bacino è stata realizzata a seguito di nuovi dettagliati rilievi geofisici e geologici (anche in aree emerse) condotti impiegando apposite strumentazioni tecniche (*multi beam*, *side scan sonar*, *sub bottom profiler*, indagini *sparker* e tomografiche) che, integrati con le informazioni e dati già in possesso, hanno restituito un aggiornamento sull'andamento e le dinamiche dei fondali (mappa geologica, mappa geomorfologica, mappa batimetrica, mappa delle isopache). Nell'insieme è stata confermata la complessità e dinamicità dei fondali e, conseguentemente, un loro equilibrio instabile, legato fondamentalmente alla genesi dell'intero bacino, condizionata nel corso delle ere geologiche da fattori quali la nanotettonica, il carsismo, l'eustatismo glaciale, la dinamica fluviale e marina. Peculiare è il carattere fluviale relitto e la presenza di sorgenti emerse e sommerse (i citri) in corrispondenza della fratturazione del corpo carbonatico, con la possibilità che il carico idrostatico della falda freatica profonda possa continuare ad aprire nuove vie di flusso verso l'esterno. Anche i processi di sedimentazione, soprattutto quelli recenti (sedimentazione olocenica, da circa 11.700 anni fa ad oggi) restituiscono un'area in cui, a fronte di un tasso di sedimentazione medio negli ultimi 10 mila anni che si attesta in 1 mm/anno, non evidenziano spessori omogenei sull'intero bacino, ma variabili anche notevolmente (tra 0.5 m e gli 11 m, di cui quelli associabili all' "età antropica" dovrebbero essere spessi circa 5 m). Questo aspetto traspare anche dallo studio degli andamenti granulometrici e stratigrafici, che mostrano come esista anche una variabilità di tipo orizzontale (eteropia) nel bacino del 1° seno. I parametri geotecnici (contenuto d'acqua naturale, indice dei vuoti, indice di plasticità, indice di liquidità, ecc.), calcolati a seguito della caratterizzazione in tal senso dei sedimenti localizzati in una piccola area a ridosso dell'Arsenale della Marina Militare (e che quindi necessitano di opportuni approfondimenti tecnici estesi anche su altre zone) evidenziano, inoltre, un comportamento "fluidico" del materiale derivante dalla sedimentazione recente (olocenica) e di come la consistenza plastica e fluido-plastica potrebbe dipendere anche dalle caratteristiche chimiche del fluido interstiziale (mix di acqua di mare, sostanze organiche, contaminanti, ecc.).

Un altro aspetto legato alle caratteristiche del bacino, considerato un ambiente di "transizione" in accordo alla Direttiva Acque (WFD, 2000/60 EC), è quello relativo alla distribuzione quali-quantitativa delle biocenosi bentoniche, ed in generale della flora e fauna acquatica. Nel Mar Piccolo risulta presente una peculiare biodiversità sia vegetale sia animale, composta per la maggior parte da macroalghe nitrofile e organismi filtratori che ben si adattano al regime di trofia di tale bacino. L'elevata biodiversità riscontrata (in numero e specie), che contribuisce al mantenimento dei sottili equilibri ecologici all'interno del bacino nonostante i numerosi impatti antropici presenti, unita alle elevate capacità di autoregolazione e di reazione del sistema sono indicatori di grandi potenzialità di ripresa dell'area dal punto di vista naturalistico ed ambientale; inoltre, nel Mar Piccolo è anche segnalata la presenza di specie soggette a regime di protezione in virtù del loro valore naturalistico.

Per quanto riguarda gli apporti di acqua di origine terrigena in Mar Piccolo, associabili sia alle falde sia al bacino idrico scolante, le indagini condotte mostrano soprattutto nel primo caso una situazione quanto meno articolata. E' noto, infatti, come la falda profonda, attestata nei Calcarei di Altamura, dreni acque provenienti da un bacino idrologico a monte di circa 900 Km² e subisca un rapido decremento delle altezze piezometriche (cadenza piezometrica del 2‰) da quote superiori a 8 m, a circa 10 Km dal bacino, a 1 m in prossimità della costa, provocando la formazione di sorgenti terrestri (Galeso, Lavandaia, Marangio, Battentieri e Riso) e subacquee (i citri Galeso e Citrello nel 1° seno, Le Copre, Calandrea e Mascione nel 2° seno). Meno studiati sono, invece, gli aspetti legati alla presenza e agli andamenti delle varie falde superficiali che, anch'esse a ricarica naturale e rilevabili nei livelli dei depositi olocenici e delle successioni plio-pleistoceniche (depositi marini sabbie e calcareniti che poggiano sulle argille) a letto di sedimenti pelitici impermeabili (argille), sono quelle potenzialmente più impattabili dalla presenza delle attività antropiche. Analogamente, non è così immediato evidenziare se e in che modo possano nascere potenziali interconnessioni tra le due tipologie di falda e se, in qualche modo, la contaminazione, se presente, migri da una all'altra. Il quadro è poi ulteriormente complicato dai consistenti fenomeni di intrusione del cuneo salino lungo la costa che, agendo sugli equilibri ionici e ossido-riduttivi, può a sua volta influenzare la presenza e la disponibilità dei contaminanti. Per queste ragioni sarebbe auspicabile, oltre ad organizzare e sistematizzare in maniera opportuna tutti i dati e le informazioni disponibili, anche prevedere una serie di indagini specialistiche *ad hoc* (di tipo geochimico e radiometrico), non realizzabili nell'ambito del presente lavoro a causa delle risorse disponibili e delle tempistiche imposte, che leghino in maniera robusta origini, cause ed effetti. Il reticolo idrografico superficiale, che recapita le acque nel 1° seno, aggiornato e validato grazie all'impiego di dati telerilevati (Lidar ed ortofoto), coincide sostanzialmente con il bacino del Galeso e dei suoi immissari principali ed è sviluppato su una superficie complessiva di poco più di 60 Km². Al suo interno ricadono sia l'Area industriale di Taranto sia l'area PIP del Comune di Statte. Combinando i dati con i modelli topografici e morfologici, nonché i parametri meteo climatici e pluviometrici, insieme all'evoluzione dell'uso del suolo (soprattutto degli ultimi 30-40 anni), è stato possibile confermare per questo bacino la sua tendenza a generare deflussi superficiali (quindi a individuare aree a potenziale allagamento), per eventi pluviometrici con tempo di ritorno di 50, 100 e 200 anni, così come il suo carattere erosivo, legato ad una prevalente presenza della componente fine (a prevalente granulometria argillosa e siltosa).

Per quanto riguarda gli aspetti idrodinamici, il modello di circolazione delle acque nell'intero bacino del Mar Piccolo ha confermato alcune caratteristiche peculiari e prevalenti, come ad esempio: la marea quale principale forzante capace di determinare correnti significative ed in misura minore il vento; la presenza dell'Idrovore dell'ILVA che ha condizionato e condiziona tutt'ora, in maniera sostanziale, la circolazione delle acque nel 1° Seno, determinando una corrente prevalente e continua diretta verso la sua bocca; l'individuazione, nel corso dell'anno, di uno schema di circolazione a strati molto complessa. Un aspetto interessante è, invece, derivato dall'aver associato a tale modello di circolazione un modello di trasporto dei sedimenti sul fondo, che ha evidenziato come esista la possibilità che gli stessi sedimenti possano subire, anche "naturalmente", dei movimenti con effetti maggiori, per sospensione e rideposito (accentuati in funzione della diminuzione nelle dimensioni delle particelle ipotizzate), in prossimità della costa, dove le correnti mostrano intensità più alte.

Le indagini finalizzate ad individuare fonti ancora attive di contaminazione hanno restituito un carattere cronico degli apporti di contaminanti veicolati dalle componenti terrigene delle acque (fonte primaria), che non esclude un effetto sinergico con le fonti secondarie, collegate ai sedimenti contaminati, e conseguentemente contribuiscono ad un complessivo deterioramento della qualità del sistema ambientale. Nel 1° Seno, le indagini condotte hanno mostrato proprio per i sedimenti un ruolo non trascurabile, attivo, e probabilmente predominante quale fonte di contaminazione verso la componente biologica (a causa delle dinamiche di risospensione), in particolare a carico degli organismi filtratori (mitili). È importante sottolineare, inoltre, che la stima sulle attuali immissioni di contaminanti nel 1° seno, in particolare PCB, da parte dei corsi d'acqua superficiali e dai citri non giustificano le elevate concentrazioni di inquinanti misurate nei sedimenti nell'ambito delle caratterizzazioni condotte. In ragione dell'attuale quantitativo dei

microinquinanti organici trasferito attraverso le acque di origine terrigena, si può ipotizzare un accumulo pregresso nei sedimenti probabilmente dovuto a immissioni di più intensa magnitudine avvenute in tempi passati, attraverso gli stessi vettori (corsi d'acqua superficiali, citri, canalizzazioni, ecc.) o con sversamenti diretti nel bacino.

Un quadro ambientale così articolato e complesso, frutto di numerose variabili di ordine naturale e/o antropico presenti, ha fatto ipotizzare che ad un unico modello concettuale rappresentativo del Mar Piccolo si associno, piuttosto, una serie di modelli ciascuno con un proprio scenario di riferimento e tra di loro strettamente interconnessi, in cui occorre considerare sia variabili tecnico-scientifiche sia componenti di ordine sociale ed economico.

Conseguentemente, l'ipotesi iniziale di poter programmare un'unica strategia d'intervento finalizzata alla bonifica del sito, ha ceduto il passo alla necessità di prevedere preliminarmente un'attenta fase di discussione e condivisione tra i principali *Stakeholder* di quanto emerso, con una propedeutica decisione sulla destinazione d'uso dell'area, prima di poter arrivare ad una scelta progettuale che ne individui la/le migliori o una loro combinazione, sotto gli aspetti di efficacia ed efficienza, tra quelle ambientalmente, tecnologicamente ed economicamente attualmente disponibili (*dragaggio*, *capping* o *reactive capping*, *bioremediation*, *monitored natural attenuation*, ecc.).

Si è, comunque, deciso di fornire nel documento alcune linee d'indirizzo generale sulle metodologie di bonifica applicabili (movimentazione, ricoprimento, attenuazione naturale) e che coinvolgono direttamente i sedimenti contaminati nelle aree ritenute prioritarie, al fine di sostanziare dal punto di vista tecnico le opzioni di intervento ritenute meglio applicabili al contesto ambientale del Mar Piccolo.

Infine, per completare il quadro generale presentato si è ritenuto utile accompagnare tali scenari di bonifica da un'analisi valutativa degli impatti ambientali associati a ciascun intervento individuato, evidenziandone per ciascuno i pro e i contro della realizzazione. È stato così fornito, su base metodologica, un valido e pratico strumento di supporto alle decisioni, in base al quale valutare e orientare le possibili opzioni di messa in sicurezza e/o bonifica.