



Interreg



UNIONE EUROPEA

SICOMAR
plus

MARITTIMO-IT F R-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



Prodotto - *Livrable* T4.3.3:

Mappe di rischio – *Cartes des risques*

Data prevista - Date prévue : //2021

Data di consegna - Date d'échéance : //2021

Versione - Version : V



Interreg



UNIONE EUROPEA



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

Introduzione / Introduction

Il Mar Mediterraneo è una delle principali rotte marittime a livello mondiale essendo attraversato da circa il 30% del traffico navale (Campana et al., 2017). Ogni anno, migliaia di cargo, petroliere e navi di ogni tipo attraversano gli affollati stretti di Gibilterra e del Bosforo popolandolo le rotte marittime dei diversi sottobacini del Mar Mediterraneo per trasportare merci di ogni tipo, inclusi prodotti chimici e petroliferi.

In tale contesto, il Mediterranean Quality Status Report (2017) del Programma ambientale delle Nazioni Unite, ha individuato una netta correlazione tra la densità del traffico marittimo e la frequenza di incidenti marittimi che danno luogo a sversamento di idrocarburi con conseguente inquinamento dell'ambiente marino e marino costiero. In particolare, REMPEC (2008) ha stimato che, nel 2006, il 18% delle spedizioni globali via mare di petrolio greggio sia avvenuto attraverso il Mar Mediterraneo indicando, quindi, tali rotte marittime tra le principali fonti di rischio sia di incidenti con fuoriuscita di petrolio sia di rilascio illegale e deliberato di idrocarburi in mare.

L'inquinamento chimico da petrolio come quello derivante da altre sostanze tossiche (e.g. metalli pesanti) ha un forte impatto sugli ecosistemi marini, e tale impatto si manifesta maggiormente quando tali sostanze inquinanti raggiungono l'ambiente marino costiero, dove, ad eccezione di aree industriali relativamente limitate, molte attività sociali ed economiche fanno spesso affidamento su un buono stato ambientale dell'ecosistema.

Ulteriori impatti di un elevato traffico marittimo sull'ambiente marino sono da ricercarsi nella diffusione di specie aliene, nell'aumento del rischio di collisioni con grandi cetacei e nella produzione di rumori e inquinamento acustico fortemente impattanti sulla biodiversità dei mari e ambienti costieri (Abdulla e Linden, 2008; Coll et al., 2012; Pennino et al., 2016; Ritter e Panigada, 2019).

Alla fine del 2019, l'Agenzia europea (European Maritime Safety Agency, 2019) per la sicurezza marittima ha pubblicato i dati mensili di densità del traffico marittimo a scala europea, fornendo, conseguentemente, agli enti di ricerca e alle società marittime uno strumento essenziale per analizzare e comprendere gli schemi e modelli del trasporto marittimo e prevederne i conseguenti impatti sia a livello ambientale che socioeconomico. Tali informazioni hanno infatti stimolato l'implementazione, da parte degli organi preposti, di sistemi per la gestione del rischio di incidenti marittimi in modalità operativa e predittiva sia per migliorare la sicurezza della navigazione che per proteggere adeguatamente l'ambiente costiero dalle conseguenze dannose di potenziali eventi di inquinamento.

In risposta ai regolamenti e alle raccomandazioni internazionali (vedi Convenzione delle Nazioni Unite sul diritto del mare - UNCLOS) le autorità nazionali e locali hanno infatti attualmente a disposizione numerosi sistemi di gestione del rischio operativo in grado di fornire scenari di valutazione dei pericoli degli inquinanti o una rapida valutazione dei pericoli in caso di incidenti marittimi. Questi sistemi si basano principalmente sull'applicazione di modelli numerici di previsione numerica di tipo idrodinamico, d'onda e di oil spill (PTM) per prevedere le traiettorie seguite dalle masse di inquinanti disperse in ambiente marino.

Tali sistemi, oltre a permettere un rapido intervento nel caso di eventi accidentali avversi, quali collisioni marittime o sversamenti operazionali, sono comunemente utilizzati per la valutazione del rischio di riduzione della qualità dell'ambiente marino costiero in relazione sia alla stima della probabilità di impatto del petrolio



Interreg



UNIONE EUROPEA



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

sversato che delle caratteristiche di vulnerabilità dei litorali. In tale contesto è stato implementato un modello numerico idrodinamico, d'onda e di oil spill a due ambienti marini e marino costieri, le Bocche di Bonifacio e l'Arcipelago Toscano, particolarmente sensibili a sversamenti di idrocarburi al fine di riprodurre le caratteristiche di circolazione delle acque superficiali e stimare la probabilità di impatto di idrocarburi a costa derivanti da potenziali sversamenti legati al traffico marittimo. Nel contempo, sia per le coste sabbiose, prevalenti nei tratti litoranei delle Bocche di Bonifacio (BB), sia per le coste rocciose dominanti il paesaggio dell'Arcipelago Toscano (AT), sono stati analizzati e stimati degli indici di vulnerabilità ed esposizione al fine di definire una scala di potenziale danno al sistema costiero in relazione all'eventualità di un impatto di idrocarburi a costa. I risultati così ottenuti sono stati quindi processati e unificati per definire, per diverse tipologie di imbarcazione quali cargo, navi passeggeri e petroliere, le mappe di rischio di impatto di idrocarburi a costa. Di seguito sono riportati una breve descrizione del modello idrodinamico e di oil spill, dei dati relativi alle rotte marittime, delle metodologie usate per la stima della vulnerabilità ed esposizione degli ambienti litoranei sabbiosi e rocciosi nonché di quelle usate per il calcolo del rischio. Successivamente, sono descritti e analizzati i risultati ottenuti per i 2 siti investigati e riportate le mappe di rischio così ottenute.



Introduction

La mer Méditerranée est l'une des principales routes maritimes au monde traversée par environ 30% du trafic maritime (Campana et al., 2017). Chaque année, des milliers de cargos, pétroliers et navires de toutes sortes traversent les détroits surpeuplés de Gibraltar et du Bosphore, peuplant les routes maritimes des différents sous-bassins de la mer Méditerranée pour transporter des marchandises de toutes sortes, y compris des produits chimiques et du pétrole.

Dans ce contexte, le Mediterranean Quality Status Report (2017) du Programme des Nations Unies pour l'environnement a identifié une corrélation claire entre la densité du trafic maritime et la fréquence des accidents maritimes qui donnent lieu à des déversements d'hydrocarbures avec une pollution conséquente de l'environnement marin et marin côtier. En particulier, le REMPEC (2008) a estimé qu'en 2006, 18 % des expéditions mondiales de pétrole brut par mer ont transité par la mer Méditerranée, indiquant ainsi que ces routes maritimes figuraient parmi les principales sources de risque d'accidents de déversement d'hydrocarbures et de rejet illégal et délibéré d'hydrocarbures en mer.

La pollution chimique par le pétrole, comme celle provenant d'autres substances toxiques (par exemple les métaux lourds), a un impact important sur les écosystèmes marins, et cet impact est plus évident lorsque ces polluants atteignent le milieu marin côtier, où, à l'exception de zones industrielles relativement limitées, de nombreuses activités sociales et économiques dépendent souvent d'un bon état écologique de l'écosystème.

D'autres impacts du trafic maritime élevé sur le milieu marin se trouvent dans la propagation d'espèces exotiques, dans le risque accru de collisions avec de grands cétacés et dans la production de pollution sonore



Interreg



UNIONE EUROPEA



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

et sonore ayant un impact important sur la biodiversité des mers et des environnements côtiers (Abdulla et Linden, 2008; Coll et coll., 2012, Pennino et coll., 2016; Ritter et Panigada, 2019).

Fin 2019, l'Agence européenne pour la sécurité maritime (European Maritime Safety Agency, 2019) a publié des données mensuelles sur la densité du trafic maritime à l'échelle européenne fournissant ainsi aux instituts de recherche et aux entreprises maritimes un outil essentiel pour analyser et comprendre les modèles et modèles du transport maritime et prévoir leurs impacts sur le plan environnemental et socio-économique. Ces informations ont en effet stimulé la mise en place, par les organismes en charge, de systèmes de gestion du risque d'accidents maritimes en mode opérationnel et prédictif à la fois pour améliorer la sécurité de la navigation et pour protéger de manière adéquate l'environnement côtier des conséquences néfastes d'événements de pollution potentielle.

En réponse aux réglementations et recommandations internationales (voir Convention des Nations Unies sur le droit de la mer - UNCLOS), les autorités nationales et locales disposent actuellement de nombreux systèmes de gestion des risques opérationnels qui peuvent fournir des scénarios d'évaluation des dangers polluants ou une évaluation rapide des dangers en cas d'accident maritime. Ces systèmes sont principalement basés sur l'application de modèles numériques de prédiction numérique hydrodynamique, de vagues et de dérive de nappe d'hydrocarbures (PTM).

Ces systèmes, en plus de permettre une intervention rapide en cas d'événements indésirables accidentels, tels que des collisions maritimes ou des déversements opérationnels, sont couramment utilisés pour évaluer le risque de réduction de la qualité du milieu marin côtier par rapport à l'estimation de la probabilité d'impact du déversement d'hydrocarbures et aux caractéristiques de vulnérabilité des côtes. Dans ce contexte, un modèle numérique hydrodynamique, de vague et de dérive de nappe d'hydrocarbures a été mis en œuvre dans deux milieux marins et côtiers, le détroit de Bonifacio et l'archipel toscan, particulièrement sensibles aux déversements d'hydrocarbures afin de reproduire les caractéristiques de circulation des eaux de surface et d'estimer la probabilité d'impact des hydrocarbures sur la côte découlant de déversements potentiels liés au trafic maritime. Dans le même temps, tant pour les côtes sablonneuses, répandues dans les tronçons côtiers du Bocche di Bonifacio (BB), que pour les côtes rocheuses dominant le paysage de l'archipel toscan (AT), des indices de vulnérabilité et d'exposition ont été analysés et estimés afin de définir une échelle de dommages potentiels au système côtier par rapport à la possibilité d'un impact des hydrocarbures sur la côte. Les résultats ainsi obtenus ont ensuite été traités et unifiés pour définir, pour différents types de bateaux tels que les cargos, les navires à passagers et les pétroliers, les cartes des risques d'impact des hydrocarbures sur la côte. Vous trouverez ci-dessous une brève description du modèle hydrodynamique et de dérive de nappe d'hydrocarbures, des données sur les routes maritimes, des méthodologies utilisées pour estimer la vulnérabilité et l'exposition des environnements côtiers sablonneux et rocheux ainsi que celles utilisées pour le calcul des risques. Par la suite, les résultats obtenus pour les 2 sites étudiés sont décrits et analysés et les cartes des risques ainsi obtenues sont rapportées.

Materiali e Metodi

METODI NUMERICI - Il cuore del sistema di previsione della circolazione, del moto ondoso e di trasporto di idrocarburi è il modello numerico SHYFEM (Umgiesser et al., 2004) un modello idrodinamico open source

basato sul metodo degli elementi finiti, che integra una suite di moduli numerici in grado di simulare la circolazione delle acque nelle 3 dimensioni, la propagazione del moto ondoso, e il destino di inquinanti disciolti o dispersi nella colonna d'acqua (Cucco et al., 2012; Canu et al. al., 2015). SHYFEM è applicato su un dominio spaziale discretizzato mediante l'utilizzo di griglie di calcolo non strutturate con risoluzione spaziale variabile che permettono di riprodurre le caratteristiche geografiche e morfo-batimetriche con elevato dettaglio qualora fosse necessario. Il modello idrodinamico risolve per ogni elemento di calcolo costituito da elementi triangolari di forma e dimensione variabili, le equazioni Shallow Water integrate su ogni strato nelle loro formulazioni con livelli e trasporti dell'acqua. Il modello riproduce quindi la circolazione delle acque indotta dalle principali forzanti meteo-marine quali i venti, le maree, i gradienti di pressione atmosferica, e le variazioni di densità. Accoppiato con il modello idrodinamico, il modello d'onda spettrale WWM (Roland et al., 2015) riproduce la generazione, propagazione e dissipazione del moto ondoso nonché fornisce al modello idrodinamico SHYFEM il contributo al momento derivato dai processi di dissipazione dell'energia cinetica propria del moto ondoso. Infine, mediante l'utilizzo, in modalità offline, di un modulo per la simulazione dei processi di avvezione e diffusione in sistema di riferimento lagrangiano, SHYFEM è in grado di riprodurre il trasporto di particelle numeriche indotto dalle correnti, dal moto ondoso e dai venti. Si rimanda a Umgieser et al., (2004) per una dettagliata descrizione dei modelli e metodi numerici utilizzati.

SHYFEM è stato applicato a 2 diversi domini spaziali nel primo caso comprendente il Golfo dell'Asinara, le Bocche di Bonifacio e l'Arcipelago della Maddalena nel secondo l'intero Arcipelago Toscano. In figura 1 si riportano alcuni dettagli delle due diverse griglie di calcolo implementate e utilizzate.

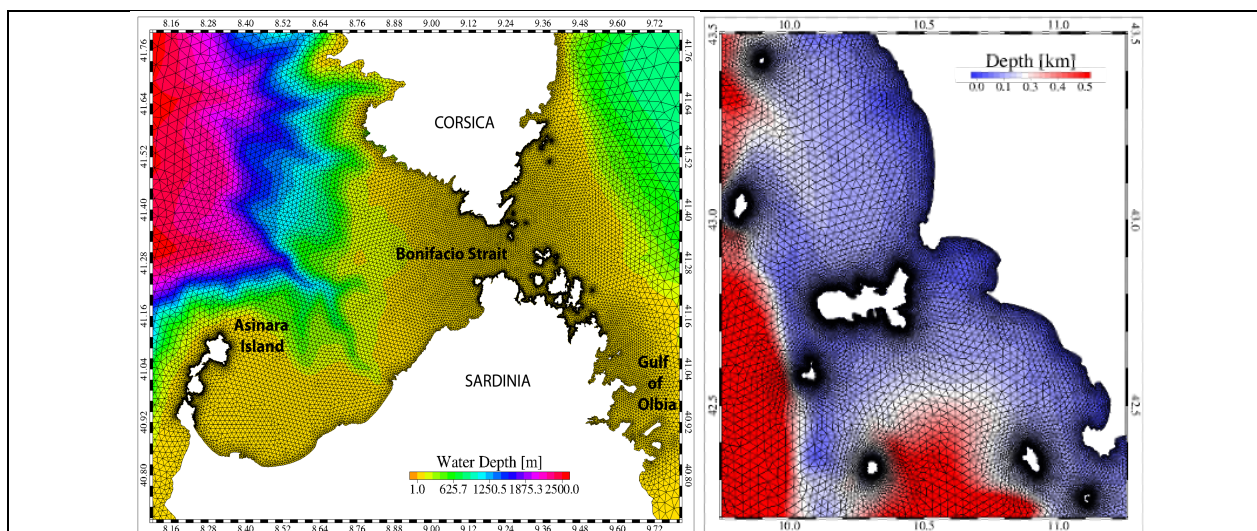


Fig.1: particolari delle 2 griglie di calcolo utilizzate per le simulazioni numeriche. Bocche di Bonifacio, pannello di sinistra e Arcipelago Toscano, pannello di destra / *détails des 2 grilles de calcul utilisées pour les simulations numériques. Bocche di Bonifacio, panneau de gauche et Archipel toscan, panneau de droite.*

Per entrambe le applicazioni sono stati utilizzati dei data set atmosferici e oceanografici per forzare il modello lungo i bordi aperti, localizzati agli estremi occidentali, meridionali e orientali delle 2 mesh, e alla superficie.

Nella fattispecie, sono stati utilizzati i dati atmosferici di rianalisi forniti dal Centro Europeo per le Previsioni Meteorologiche a medio termine (ECMWF) caratterizzati da una risoluzione temporale di 3 ore e una copertura spaziale estesa a tutto il bacino del Mar Mediterraneo. Per quanto riguarda i dati oceanografici, che comprendono sia i dati di temperatura, salinità e livello, sono stati utilizzati i data set giornalieri a risoluzione di 4 km prodotti dal Mediterranean Forecasting System (Simoncelli et al., 2019) e forniti dal sistema Copernicus Marine Service.

Sono state effettuate simulazioni pluriannuali mediante l'utilizzo delle potenzialità computazionali della WS Dell Precision R7920 acquistata nell'ambito del progetto SICOMARplus. I risultati del modello sono stati confrontati con i dati misurati di correnti superficiali mediante l'utilizzo di correntometri lagrangiani. In particolare, per le BB sono stati utilizzati i dati raccolti durante l'anno 2018, mentre per il AT sono stati utilizzati di dati correntometrici relativi agli anni 2019 e 2020. È stata applicata una procedura di calibrazione del modello numerico al fine di ridurre l'errore di previsione delle traiettorie seguite dai drifters lanciati rispettivamente nelle 2 aree di interesse. In figura 2 si riportano alcune delle traiettorie utilizzate per la validazione del modello e da cui è stata stimato il grado di accuratezza dello stesso nel riprodurre la circolazione e il conseguente trasporto superficiale ad opera di venti, onde e correnti.

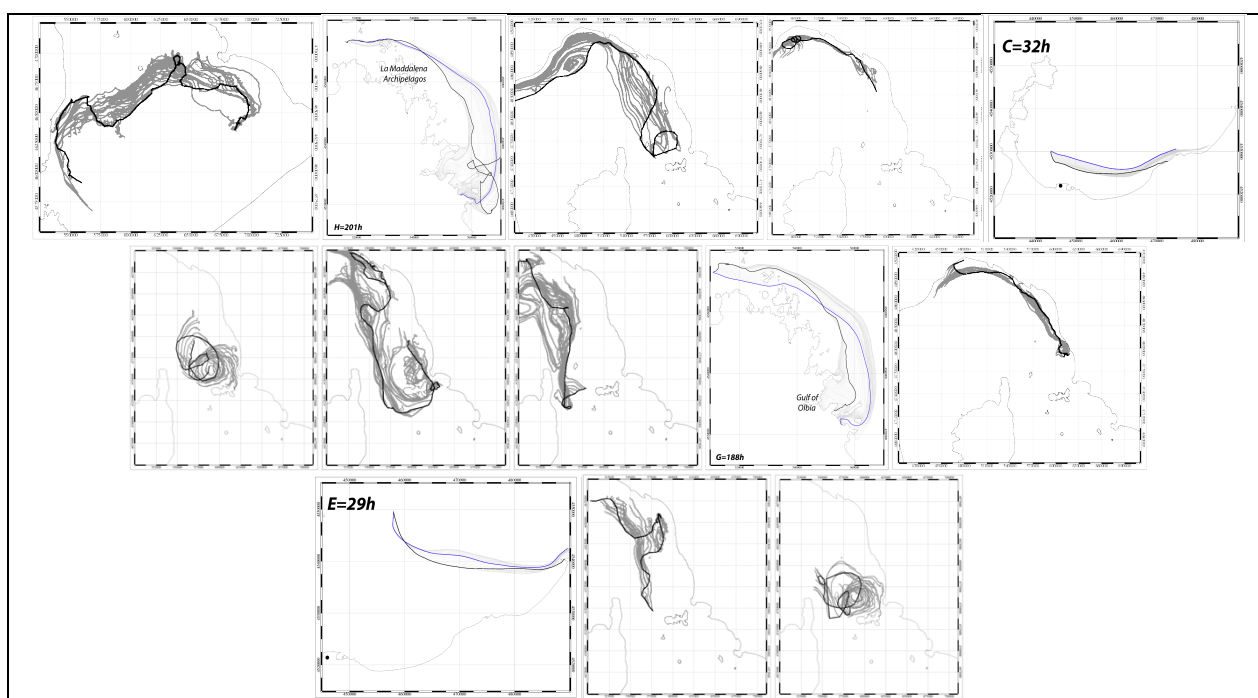
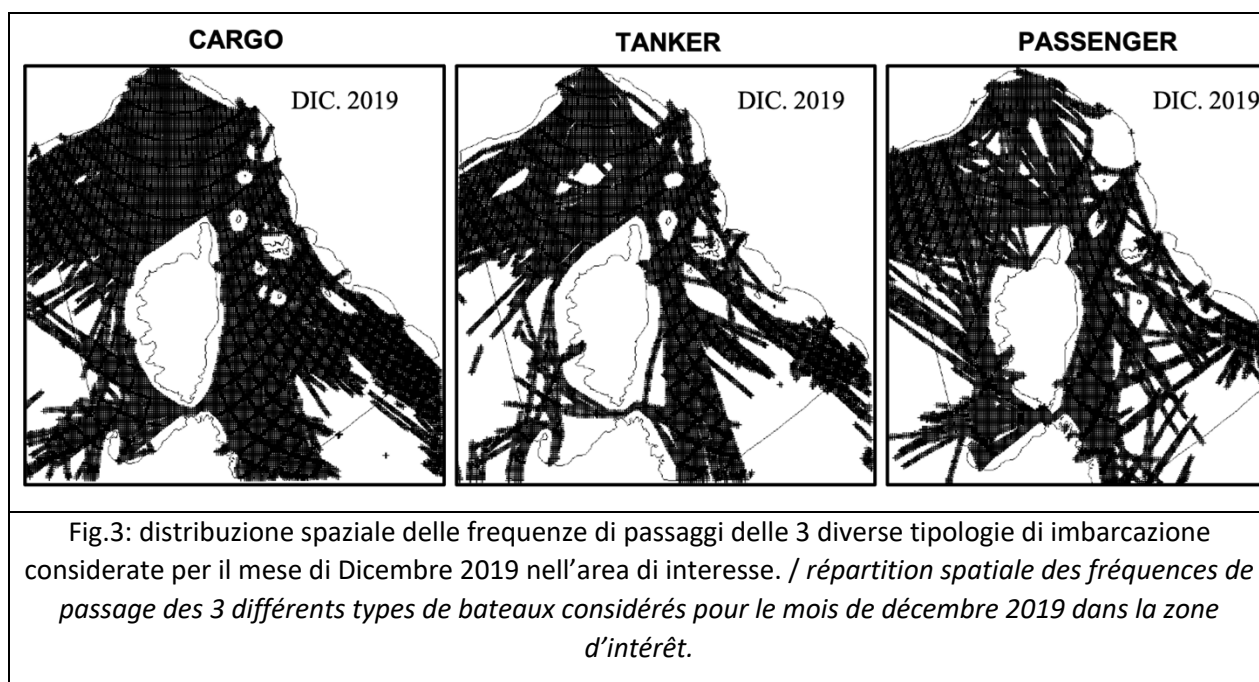


Fig.2: selezione di alcuni risultati ottenuti dalle simulazioni numeriche di trasporto superficiale effettuate per determinare l'accuratezza delle simulazioni numeriche. / *sélection de certains résultats obtenus à partir de simulations numériques de transport de surface réalisées pour déterminer la précision des simulations numériques.*

Dalla procedura di calibrazione è emerso un errore medio di previsione per l'area delle BB sulle 24 ore compreso tra 0,12 e 0,34 a cui corrispondono discrepanze tra le particelle numeriche e la posizione del drifter

nelle previsioni di 24 ore variabili in media tra 1,3 km fino a circa 7,7 km per l'area delle BB. Per quanto riguarda l'AT l'errore è stato stimato a 10 giorni di previsione e si attesta intorno a 0.29 con una separazione dell'ordine dei 40 km.

DATI SULLE ROTTE MARITTIME Sono stati utilizzati i dati di traffico marittimo relativi agli anni 2018, 2019 e 2020 distribuiti dal portale EMODNET. In particolare, la probabilità di sversamento di idrocarburi in mare è stata correlata, come suggerito Mediterranean Quality Status Report (2017), ai valori mensili della frequenza di passaggi di imbarcazioni su km². Tale parametro noto come *marine traffic density* fornisce una misura del traffico marittimo in relazione al tempo di presenza di imbarcazioni durante ogni mese all'interno di ogni unità di superficie. Il data set, espresso in numero di ore su km² è disponibile su griglia regolare georeferenziata per diverse categorie di imbarcazioni. Ai fine dello studio sono state considerate 3 categorie di imbarcazioni ovvero Cargo, Petroliere e Navi passeggeri, comunemente presenti nelle aree di interesse e potenzialmente associabili a sorgenti di rischio di sversamento incidentale e accidentale di idrocarburi. In figura 3 sono riportate le mappe di distribuzione delle celle di frequenza dei passaggi di navi appartenenti alle 3 categorie suddette per il mese di Dicembre 2019 nell'area di interesse.



I dati relativi al traffico marittimo degli anni 2019 e 2020 sono stati analizzati per valutare gli effetti del COVID19 sull'intensità dei flussi marittimi e conseguentemente sulla stima del rischio potenziale da impatto di idrocarburi a costa. In particolare, dai dati di densità del traffico marittimo relativi all'area del *Santuario Pelagos*, sono state calcolate, per ogni mese dell'anno, le differenze nel numero totale di ore mensili navigate (ST) e di celle non interessate dal passaggio di navi (NS) tra gli anni 2019 e 2020. In figura 4 sono riportati i risultati suddivisi per categoria. Come si evince, durante la maggior parte dei mesi dell'anno 2020 è stato registrato un calo significativo di ST e un aumento NS per tutte le categorie in misura maggiore per le navi passeggeri e in misura minore per le categorie Petroliere e Cargo. In particolare, i rapporti tra i flussi marittimi

delle 3 categorie espressi in termini di ST annuale e definiti mediante la seguente espressione Passeggeri:Cargo:Petroliere sono passati da 2.08:2.07:1 per l'anno 2019 a 1.93:2.14:1 per l'anno 2020 con riduzioni dello ST annuale variabili tra il 6.8%, per la categoria Cargo, al 16.4% per le navi passeggeri.

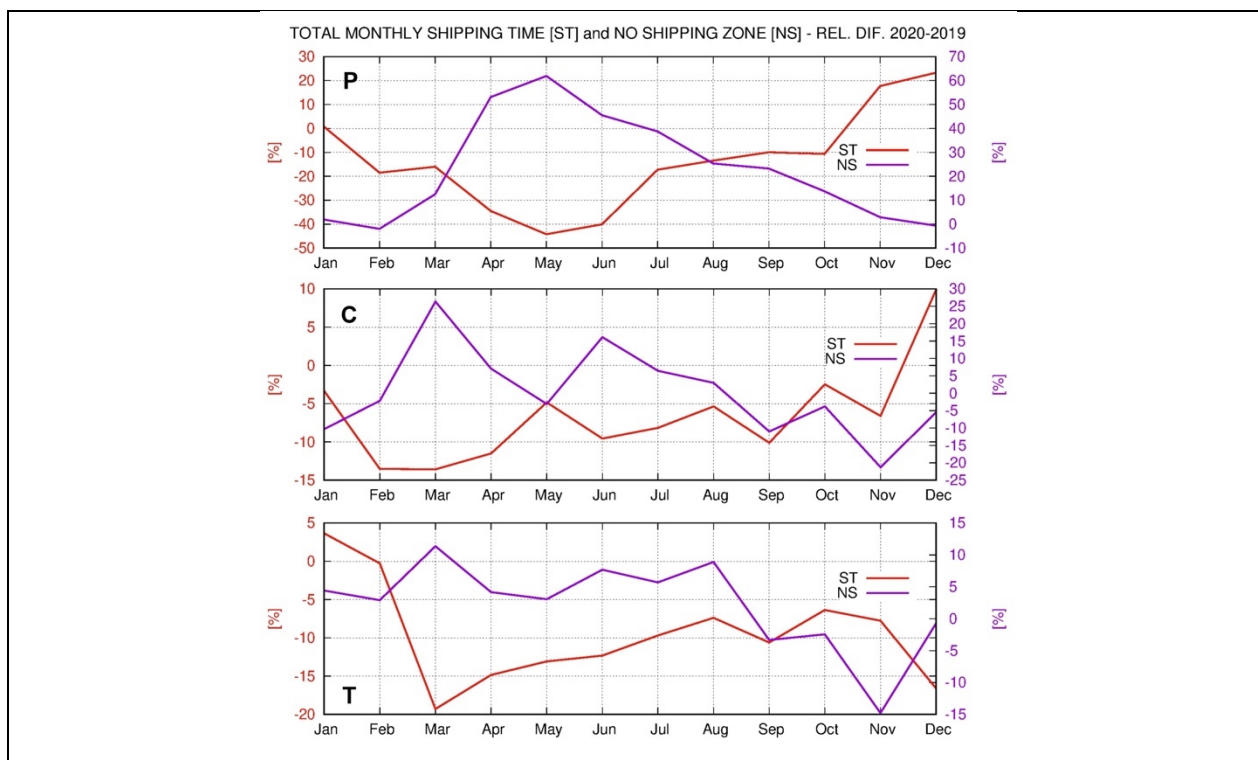


Fig.4: rapporto incrementale del numero mensile di ore navigate (ST – linee rosse) e il numero di celle non interessate dal passaggio (NS – linee blu) tra gli anni 2019 e 2020 per le 3 categorie di navi considerate Passeggeri (P), Cargo (C) e Petroliere (T). Valori negativi di ST% indicano una riduzione del numero di ore di navigazione nel 2020 rispetto al 2019, valori positivi del NS% indicano un aumento del numero di celle non interessate dal traffico marittimo nell'anno 2020 rispetto all'anno 2019. / *rapport différentiel du nombre mensuel d'heures de navigation (ST – lignes rouges) et du nombre de cellules non affectées par le passage (NS – lignes bleues) entre les années 2019 et 2020 pour les 3 catégories de navires considérés comme passagers (P), cargo (C) et pétroliers (T). Les valeurs négatives de ST% indiquent une réduction du nombre d'heures de navigation en 2020 par rapport à 2019, les valeurs positives de NS% indiquent une augmentation du nombre de cellules non affectées par le trafic maritime en 2020 par rapport à l'année 2019.*

VULNERABILITÀ, ESPOSIZIONE E DANNO COSTE SABBIOSE Per le coste sabbiose, prevalentemente localizzate nell'area delle Bocche di Bonifacio, è stato stimato un apposito indice di vulnerabilità ed esposizione mediante processamento dei dati geomorfologici forniti dal Geodatabase della Regione Sardegna (2020) e dall'Agenzia Europea dell'Ambiente (2005). Utilizzando apposite API di GoogleEarth le informazioni riguardanti la tipologia di costa sono state discretizzate su una griglia regolare con passo spaziale di 100 metri le cui celle sono state centrate lungo il litorale. La scelta di tale risoluzione è mutuata dalla

necessità di descrivere in modo efficace le principali caratteristiche geomorfologiche delle coste delle BB. Per ogni cella relativa alla tipologia di costa sabbiosa sono associate le seguenti informazioni: la pendenza della spiaggia e la granulometria media dei sedimenti che la costituiscono suddivisa in 3 macro-categorie ovvero ghiaie, sabbie e fango. Sono inoltre indicate per i tratti non sabbiosi l'esistenza di strutture artificiali quali banchine, moli o porti e nel caso di coste rocciose le caratteristiche geologiche delle rocce ovvero se costituiti da roccia dura, roccia erosa. Per questo tipo di coste sabbiose la vulnerabilità è stata definita come una misura della sensibilità ambientale del sistema costiero all'eventuale impatto di uno sversamento (Azevedo et al., 2017 e relativo elenco di riferimento). In particolare, la vulnerabilità di questi sistemi complessi, che implicano la presenza di interconnessioni tra esigenze ed interventi di tipo antropico e processi e dinamiche dell'ecosistema marino-costiero, è correlata a quelle proprietà intrinseche dell'ambiente che determinano la resistenza e resilienza dell'ecosistema esposto ad una fonte di inquinamento modulano (Salter, 1997; Kleissen et al., 2007; Lahr e Kooistra, 2010). Nel caso specifico dell'ambiente intertidale di tipo mobile (ovvero le spiagge), tali proprietà intrinseche sono da individuarsi nelle loro caratteristiche geomorfologiche. Per queste ragioni e nel contesto del presente caso di studio è stato definito un indice di sensibilità ambientale sulla base della pendenza e granulometria principale dei litorali sabbiosi. In particolare è stato utilizzato l'indice ESI così come definito dalla National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, 2002) ovvero variabile tra $ESI = \{1, 2\}$ associato a litorali ad alta energia, regolarmente esposti ad intenso moto ondoso e con forti correnti di marea, $ESI = \{3, 4, 5, 6\}$ tipico di litorali esposti ad intenso moto ondoso solo in determinati periodi dell'anno grado fino a valori di $ESI = \{7, 8\}$ associati a litorali a bassa energia con granulometria fine e bassa pendenza generalmente riparati dal moto ondoso fino a $ESI = \{9\}$ che individua litorali ad elevato grado di antropizzazione. Maggiore è il grado dell'indice ESI, maggiore è la vulnerabilità, l'esposizione e il danno del litorale a seguito di un potenziale spiaggiamento di idrocarburi in relazione sia alla efficacia di rimozione spontanea, ad opera del moto ondoso e delle correnti, sia al successo di eventuali interventi di rimozione meccanica ad opera dell'uomo. In figura 5 è riportata la distribuzione dell'indice ESI calcolato per l'area delle BB.

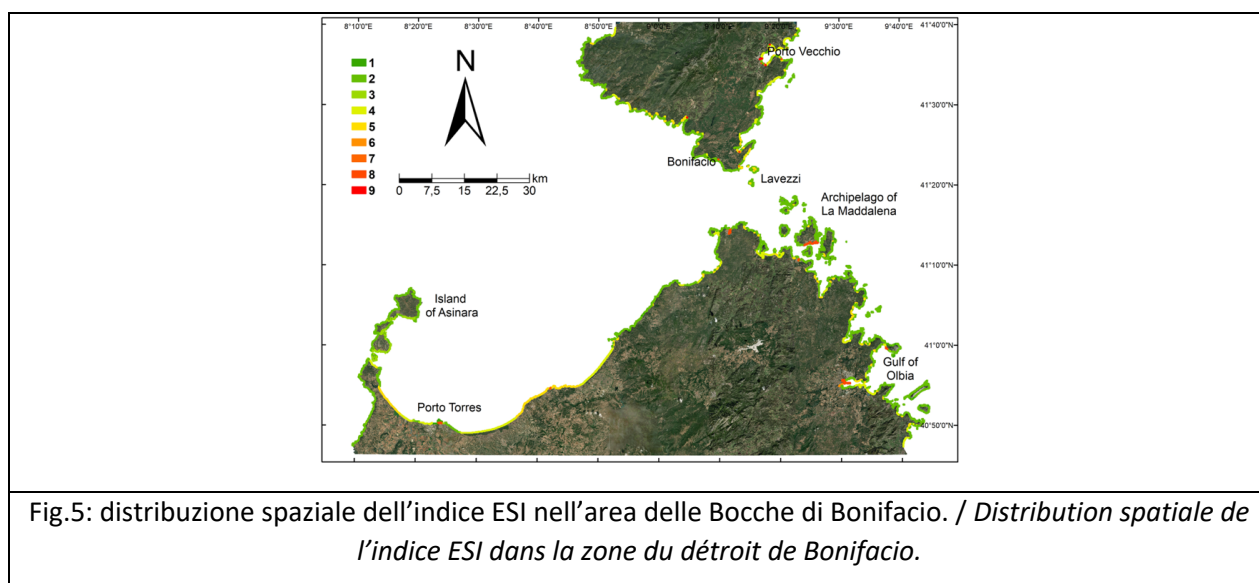
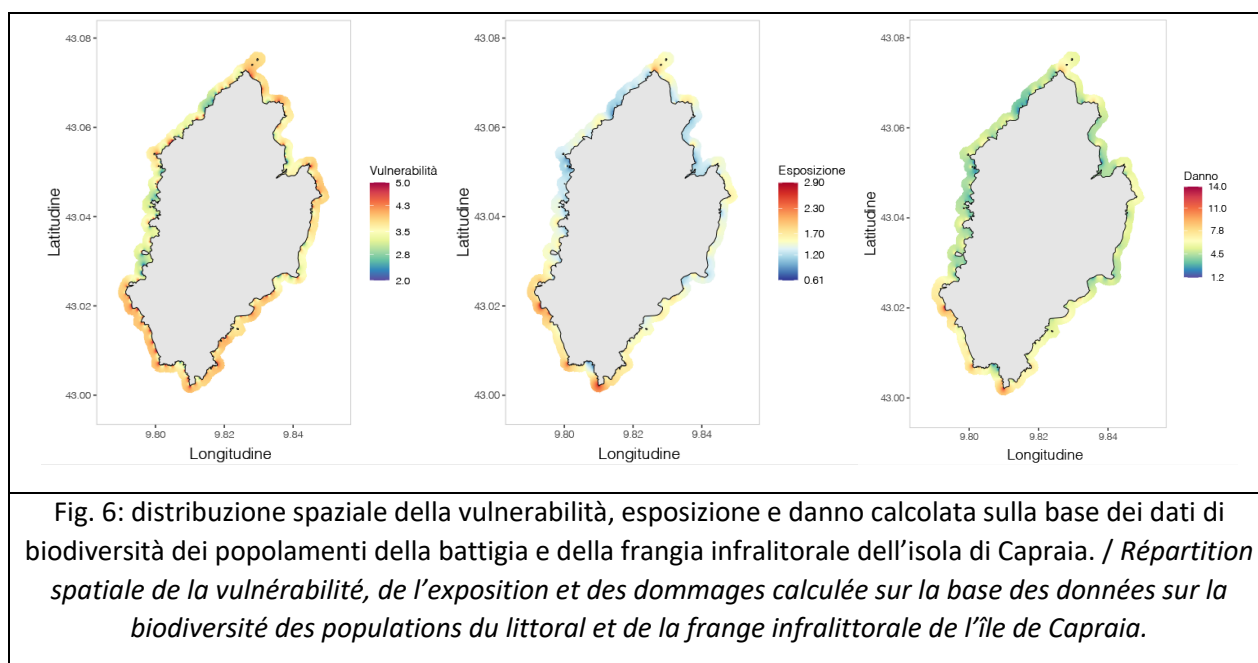


Fig.5: distribuzione spaziale dell'indice ESI nell'area delle Bocche di Bonifacio. / *Distribution spatiale de l'indice ESI dans la zone du détroit de Bonifacio.*

VULNERABILITÀ, ESPOSIZIONE E DANNO PER COSTE ROCCIOSE. Per le coste rocciose, il concetto di efficacia di rimozione spontanea o meccanica non è di facile applicazione ed inoltre non particolarmente adatto a definirne la vulnerabilità. Sebbene variabili quali la pendenza e l'esposizione al moto ondoso possano influenzare la permanenza degli idrocarburi in adesione alle rocce, la vulnerabilità, l'esposizione e il potenziale danno da impatto di idrocarburi è stato determinato sulla base della qualità ecologica del popolamento costiero ad esso associato che la capacità di ripristino dello stesso a seguito dello sversamento di sostanze inquinanti. In tale contesto, nell'ambito del progetto SICOMARplus sono stati definiti diversi indici di vulnerabilità, esposizione e di danno in base alle caratteristiche dei popolamenti bentonici intertidali degli ambienti rocciosi nelle isole dell'AT. In particolare sono state effettuate una serie di campagne di rilevazione che hanno permesso di quantificare il grado di biodiversità degli ecosistemi costieri rocciosi da i quali sono stati determinati di dei punteggi di vulnerabilità, esposizione e danno potenziale. Si rimanda al prodotto 4.3.2 per una dettagliata descrizione dei metodi utilizzati e dei risultati ottenuti. Di seguito in figura 6 si riportano, a titolo di esempio, le mappe di vulnerabilità, esposizione e danno ottenute per l'isola di Capraia.



METODO DI CALCOLO DELLA PERICOLOSITA' Il modello PTM, descritto precedentemente, è stato utilizzato per simulare il percorso seguito da particelle numeriche emulanti sversamenti di idrocarburi trasportate dalle correnti prodotte dal modello idrodinamico per gli anni 2018, 2019 e 2020. In particolare, in base alla distribuzione spaziale delle densità mensili del traffico marittimo sono state rilasciate, giornalmente e per goni categoria di imbarcazione, migliaia di particelle numeriche nelle aree di interesse. Per ogni particella, è stato calcolato il percorso effettuato nell'arco dei successivi 10 giorni al momento del rilascio e l'eventuale impatto a costa. Le particelle rilasciate rappresentano una massa unitaria di idrocarburi le cui caratteristiche fisico chimiche dipendono dalla tipologia di imbarcazione considerata. Mediante l'utilizzo di un modello di oil spill (MEDSLIK-II, Zodiatis et al., 2008) sono state calcolate le variazioni relative della massa associata ad ogni particella numerica indotte dai principali processi di *weathering*, quali l'evaporazione.



Interreg



UNIONE EUROPEA

SICOMAR plus

MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

Per ogni simulazione mensile, per ogni categoria di imbarcazione, e per ogni elemento di costa del dominio di calcolo sono stati quindi calcolati i seguenti parametri:

Densità di Impatti ovvero il numero di particelle spiaggiate per lunghezza di segmento costiero espressa come:

$$ID_j = \frac{n_j}{L_j}$$

dove L è la lunghezza del j -esimo segmento costiero ed n è il numero totale di particelle che vi spiaggiano.

Densità di Traffico ovvero la media dei valori di densità di traffico marittimo delle particelle spiaggiate in ogni segmento costiero espressa come:

$$A_VD_j = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} VD_{j,i}$$

con VD che indica la di traffico associata alla particella i -esima, n il numero totale di particelle che raggiungono il j -esimo segmento costiero.

Volume Residuo di petrolio leggero (VLO) e pesante (VHO) medio associato alle particelle spiaggiate sul segmento costiero j -esimo espresso come:

$$VLO_j(t) = g(A_age_j)$$

$$VHO_j(t) = f(A_age_j)$$

e ottenuto mediante l'applicazione del modello di *weathering* per l'arco di tempo medio (A_age) intercorso tra il momento del rilascio e lo spiaggiamento di tutte le particelle nel tratto litoraneo j -esimo, con g e f che rappresentano le funzioni di riduzione della massa unitaria, calcolate da MEDSLIK, in funzione dell'età della particella e delle caratteristiche meteo marine, calcolate per il carburante navale (fuel oil) e per un tipico prodotto petrolifero comunemente trasportato in quest'area (Arabian Crude Oil).

La *Pericolosità (HZ)* è stata quindi calcolata per il j -esimo segmento costiero e per ogni tipo di imbarcazione utilizzando la seguente formulazione

$$HZ_j^s = ID_j^s * A_VD_j^s * VO_j^s$$

$$VO_j^s = (n^s * VLO_j^s + m^s * VHO_j^s)$$

dove, con s si indica la categoria di imbarcazione, k e m i pesi utilizzati per frazionare gli idrocarburi dispersi tra *fuel oil* e prodotti petroliferi in relazione alla tipologia di imbarcazione ovvero variabili tra $k = m = 0,5$ per le petroliere (greggio più carburante), $k = 1$ e $m = 0$ per le navi Cargo e Passeggeri (solo carburante). Si rimanda a Quattrocchi et al., (2021) per una dettagliata descrizione della metodologia utilizzata. In figura 6 si riportano le mappe di pericolosità ottenute per l'anno 2018 per l'area delle Bocche di Bonifacio.

METODO DI CALCOLO DEL RISCHIO Per le coste sabbiose, non è stato possibile definire il danno indotto da un possibile sversamento di petrolio in quanto stimabile se non in relazione ad aspetti socioeconomici e



quindi prettamente legati a sfruttamento antropico e alle perdite generate nel comparto turistico. Si è quindi proceduto a correlare in maniera diretta tale danno alla vulnerabilità del litorale espressa dall'indice ESI senza discriminare tra litorali ad elevata e bassa fruizione balneare e turistica. In tutti i casi, quindi, la difficoltà di eliminazione degli idrocarburi spiaggiati, sia essa spontanea che meccanica, è stato considerato come un *proxy* del danno potenziale indotto dall'impatto di idrocarburi nei litoranei sabbiosi. Per quanto riguarda invece le coste rocciose, le procedure precedentemente descritte hanno permesso di stimare la distribuzione spaziale del danno indotto dall'impatto di idrocarburi sugli ecosistemi circalitorali. Fatta tale premessa, il rischio è stato quindi definito come prodotto della Pericolosità (HZ) per il Danno (D):

$$RI_j^S = HZ_j^S * D_j$$

e calcolato per ogni j-esimo tratto litoraneo e per ogni categoria di imbarcazione s usando per D l'indice ESI per le coste sabbiose e il Danno stimato su base ecologica per le coste rocciose. Tale procedura prevede un processo di normalizzazione di entrambi i fattori rispetto ai corrispettivi valori massimi.



Matériel et méthodes

MÉTHODES NUMÉRIQUES - *Le cœur du système de prédiction de la circulation, du mouvement des vagues et du transport des hydrocarbures est le modèle numérique SHYFEM (Umgiesser et al., 2004), un modèle hydrodynamique open source basé sur la méthode des éléments finis, qui intègre une suite de modules numériques capables de simuler la circulation de l'eau dans les 3 dimensions, la propagation du mouvement des vagues et le devenir des polluants dissous ou dispersés dans la colonne d'eau (Cucco et coll., 2012; Canu et al. al., 2015). SHYFEM est appliqué sur un domaine spatial discrétisé en utilisant de grilles de calcul non structurées à résolution spatiale variable qui permettent de reproduire les caractéristiques géographiques et morpho-bathymétriques avec des détails élevés si nécessaire. Le modèle hydrodynamique résout pour chaque élément de calcul constitué d'éléments triangulaires de forme et de taille variables, les équations d'eau peu profonde intégrées sur chaque couche dans leurs formulations avec les niveaux d'eau et les transports. Le modèle reproduit donc la circulation marine induite par les principaux forçages météo-marins tels que les vents, les marées, les gradients de pression atmosphérique et les variations de densité. Couplé au modèle hydrodynamique, le modèle d'onde spectrale WWM (Roland et al., 2015) reproduit la génération, la propagation et la dissipation du mouvement des ondes ainsi que fournit la contribution dérivée des processus de dissipation de l'énergie cinétique à modèle hydrodynamique. Enfin, grâce à l'utilisation, en mode hors ligne, d'un module de simulation des processus d'advection et de diffusion dans le référentiel lagrangien, SHYFEM est capable de reproduire le transport de particules numériques induites par les courants, le mouvement des vagues et les vents. Voir Umgiesser et coll. (2004) pour une description détaillée des modèles numériques et des méthodes utilisées.*

SHYFEM a été appliqué à 2 domaines spatiaux différents dans le premier cas, y compris le golfe de l'Asinara, le détroit de Bonifacio et l'archipel de la Maddalena dans le second l'ensemble de l'archipel toscan. La figure 1 montre quelques détails des deux grilles de calcul différentes mises en œuvre et utilisées.



Interreg



UNIONE EUROPEA

SICOMARplus

MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

Pour les deux applications, des ensembles de données atmosphériques et océanographiques ont été utilisés pour forcer le modèle le long des bords ouverts, situés aux extrêmes ouest, sud et est des 2 mailles, et à la surface. Dans ce cas, les données de ré-analyse atmosphérique fournies par le Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (ECMWF) caractérisées par une résolution temporelle de 3 heures et une couverture spatiale étendue au bassin de la mer Méditerranée ont été utilisées. En ce qui concerne les données océanographiques, qui comprennent à la fois des données de température, de salinité et de niveau, les ensembles de données quotidiens à une résolution de 4 km produits par le système de prévision méditerranéen (Simoncelli et al., 2019) et fournis par le système Copernicus Marine Service ont été utilisés.

Des simulations pluriannuelles ont été réalisées en utilisant le potentiel de calcul du WS Dell Precision R7920 acheté dans le cadre du projet SICOMARplus. Les résultats du modèle ont été comparés aux données mesurées des courants de surface à l'aide de courantomètres lagrangiens. En particulier, pour le BB, les données collectées au cours de l'année 2018 ont été utilisées, tandis que pour l'AT, les données correntométriques relatives aux années 2019 et 2020 ont été utilisées. Une procédure d'étalonnage de modèle numérique a été appliquée afin de réduire l'erreur de prévision des trajectoires suivies par les dériveurs lancés respectivement dans les 2 zones d'intérêt. La figure 2 montre quelques-unes des trajectoires utilisées pour la validation du modèle et à partir desquelles le degré de précision de celui-ci dans la reproduction de la circulation et le transport de surface qui en résulte par les vents, les vagues et les courants a été estimé.

La procédure d'étalonnage a révélé une erreur de prévision moyenne pour la zone BB sur 24 heures entre 0,12 et 0,34 qui correspond à des écarts entre les particules numériques et la position du dériveur dans les prévisions de 24 heures variant en moyenne entre 1,3 km et environ 7,7 km pour la zone BB. Quant à l'AT, l'erreur a été estimée à 10 jours de prévision et se situe autour de 0,29 avec une séparation de l'ordre de 40 km.

DONNÉES SUR LES ROUTES MARITIMES *Les données sur le trafic maritime pour les années 2018, 2019 et 2020 distribuées par le web portail EMODNET ont été utilisées. En particulier, la probabilité de déversement d'hydrocarbures en mer a été corrélée, comme le suggère Mediterranean Quality Status Report (2017), aux valeurs mensuelles de la fréquence des passages des bateaux sur le km². Ce paramètre connu sous le nom de densité du trafic maritime fournit une mesure du trafic maritime par rapport au temps de présence des navires au cours de chaque mois dans chaque unité de zone. L'ensemble de données, exprimé en nombre d'heures sur le km², est disponible sur une grille géoréférencée régulière pour différentes catégories de bateaux. À la fin de l'étude, 3 catégories de bateaux ont été prises en compte, à savoir les cargos, les pétroliers et les navires à passagers, couramment présents dans les zones d'intérêt et potentiellement associés à des sources de risque de déversement accidentel et accidentel d'hydrocarbures. La figure 3 montre les cartes de répartition des cellules de fréquence des passages des navires appartenant aux 3 catégories susmentionnées pour le mois de décembre 2019 dans la zone d'intérêt.*

Les données relatives au trafic maritime pour les années 2019 et 2020 ont été analysées afin d'évaluer les effets de la COVID19 sur l'intensité des flux maritimes et par conséquent sur l'estimation du risque potentiel de l'impact des hydrocarbures sur les côtes. En particulier, à partir des données de densité du trafic maritime relatives à la zone du sanctuaire de Pelagos, les différences dans le nombre total d'heures mensuelles parcourues (ST) et de cellules non affectées par le passage des navires (NS) entre les années 2019 et 2020 ont été calculées pour chaque mois de l'année. La figure 4 montre les résultats ventilés par catégorie. Comme on



Interreg



UNIONE EUROPEA



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

peut le constater, au cours de la plupart des mois de l'année 2020, il y a eu une baisse significative de ST et une augmentation de NS pour toutes les catégories dans une plus grande mesure pour les navires à passagers et dans une moindre mesure pour les catégories Pétroliers et Cargo. En particulier, les rapports entre les flux maritimes des 3 catégories exprimés en ST annuel et définis par l'expression suivante Passagers:Cargo:Pétroliere sont passés de 2.08:2.07:1 pour l'année 2019 à 1.93:2.14:1 pour l'année 2020 avec des réductions de la ST annuelle variant entre 6,8%, pour la catégorie Cargo, à 16,4% pour les navires à passagers.

VULNÉRABILITÉ, EXPOSITION ET DOMMAGES CÔTES SABLONNEUSES Pour les côtes sablonneuses, principalement situées dans la zone du détroit de Bonifacio, un indice spécial de vulnérabilité et d'exposition a été estimé en traitant les données géomorphologiques fournies par la Géodatabase de la région Sardaigne (2020) et par l'Agence européenne pour l'environnement (2005). À l'aide d'API GoogleEarth spéciales, les informations concernant le type de côte ont été discrètes sur une grille régulière avec un pas spatial de 100 mètres dont les cellules étaient centrées le long de la côte. Le choix de cette résolution est emprunté à la nécessité de décrire efficacement les principales caractéristiques géomorphologiques des côtes du BB. Pour chaque cellule liée au type de côte sablonneuse, les informations suivantes sont associées : la pente de la plage et la taille moyenne des grains des sédiments qui la composent divisées en 3 macro-catégories ou gravier, sable et boue. L'existence de structures artificielles telles que des quais, des jetées ou des ports est également indiquée pour les tronçons non sablonneux et, dans le cas des côtes rocheuses, les caractéristiques géologiques des roches ou, si elles sont constituées de roche dure, de roche érodée. Pour ce type de côtes sablonneuses, la vulnérabilité a été définie comme une mesure de la sensibilité environnementale du système côtier à l'impact possible d'un déversement (Azevedo et al., 2017 et liste de référence connexe). En particulier, la vulnérabilité de ces systèmes complexes, qui impliquent la présence d'interconnexions entre les besoins anthropiques et les interventions, les processus et la dynamique de l'écosystème marin-côtier, est liée aux propriétés intrinsèques de l'environnement qui déterminent la résistance et la résilience de l'écosystème exposé à une source de pollution modulée (Salter, 1997; Kleissen et coll., 2007; Lahr et Kooistra, 2010). Dans le cas spécifique de l'environnement intertidal mobile (c'est-à-dire les plages), ces propriétés intrinsèques doivent être identifiées dans leurs caractéristiques géomorphologiques. Pour ces raisons et dans le contexte de la présente étude de cas, un indice de sensibilité environnementale a été défini sur la base de la pente principale et de la taille des grains des côtes sablonneuses. En particulier, l'indice ESI tel que défini par la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, 2002) a été utilisé, c'est-à-dire variable entre $ESI = \{1, 2\}$ associé à des côtes de haute énergie, régulièrement exposées à un mouvement intense des vagues et à de forts courants de marée, $ESI = \{3, 4, 5, 6\}$ typique des côtes exposées au mouvement intense des vagues seulement à certaines périodes de l'année jusqu'à des valeurs de $ESI = \{7, 8\}$ associé aux côtes à faible énergie avec une granulométrie fine et une faible pente généralement à l'abri du mouvement des vagues jusqu'à $ESI = \{9\}$ qui identifie les côtes avec un degré élevé d'anthropisation. Plus le degré de l'indice ESI est élevé, plus la vulnérabilité, l'exposition et les dommages du littoral résultant d'un échouage potentiel d'hydrocarbures sont importants, tant par rapport à l'efficacité de l'élimination spontanée, par le mouvement et les courants des vagues, que par le succès de toute intervention d'enlèvement mécanique par l'homme. La figure 5 montre la distribution de l'indice ESI calculé pour la zone BB.

VULNÉRABILITÉ, EXPOSITION ET DOMMAGES AUX CÔTES ROCHEUSES. Pour les côtes rocheuses, le concept d'efficacité de l'enlèvement spontané ou mécanique n'est pas facile à appliquer et n'est pas non plus



particulièrement adapté pour définir leur vulnérabilité. Bien que les variables dans lesquelles la pente et l'exposition au mouvement des vagues puissent affecter la permanence des hydrocarbures dans l'adhérence aux roches, la vulnérabilité, l'exposition et les dommages potentiels causés par l'impact des hydrocarbures ont été déterminés sur la base de la qualité écologique du peuplement côtier qui lui est associé et de la capacité de le restaurer après un déversement de polluants. Dans ce contexte, dans le cadre du projet SICOMARplus, différents indices de vulnérabilité, d'exposition et de dommages ont été définis en fonction des caractéristiques des populations benthiques intertidales des milieux rocheux des îles de l'AT. En particulier, une série de campagnes d'enquête ont été menées qui ont permis de quantifier le degré de biodiversité des écosystèmes côtiers rocheux à partir duquel des dizaines de vulnérabilités, d'expositions et de dommages potentiels ont été déterminés. Veuillez-vous référer au produit 4.3.2 pour une description détaillée des méthodes utilisées et des résultats obtenus. Ci-dessous, dans la figure 6, nous rapportons, à titre d'exemple, les cartes de vulnérabilité, d'exposition et de dommages obtenues pour l'île de Capraia.

Méthode de calcul du danger Le modèle PTM, décrit ci-dessus, a été utilisé pour simuler la trajectoire suivie par des particules numériques émulant les déversements d'hydrocarbures transportés par les courants produits par le modèle hydrodynamique pour les années 2018, 2019 et 2020. En particulier, sur la base de la répartition spatiale des densités mensuelles du trafic maritime, des milliers de particules numériques ont été libérées quotidiennement et pour chaque catégorie de navires, dans les zones d'intérêt. Pour chaque particule, la trajectoire empruntée au cours des 10 jours suivants au moment de la libération et l'impact possible sur la côte ont été calculés. Les particules libérées représentent une unité de masse d'hydrocarbures dont les caractéristiques physico-chimiques dépendent du type de récipient considéré. À l'aide d'un modèle de fuite d'huile (MEDSLIK-II, Zodiatis et coll., 2008), les variations relatives de la masse associée à chaque particule numérique induites par les principaux processus d'altération, comme l'évaporation, ont été calculées.

Pour chaque simulation mensuelle, pour chaque catégorie de bateau et pour chaque élément de coût du domaine de calcul, les paramètres suivants ont ensuite été calculés :

Densité des impacts ou nombre de particules échouées par longueur de segment côtier exprimé comme suit:

$$ID_j = \frac{n_j}{L_j}$$

où L est la longueur du j -ième segment côtier et n est le nombre total de particules qui s'y échouent.

Densité du trafic ou moyenne des valeurs de densité du trafic maritime des parcelles échouées dans chaque segment côtier exprimée en:

$$A_{VD_j} = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} VD_{j,i}$$

avec VD indiquant le trafic associé à la i -ième particule, n le nombre total de particules atteignant le j -ième segment côtier.

Volume moyen de pétrole lourd (VHO) et légers (VLO) résidus associés aux particules échouées sur le j -ème segment côtier exprimé en:



$$VLO_j(t) = g(A_{age_j})$$

$$VHO_j(t) = f(A_{age_j})$$

et obtenu en appliquant le modèle d'altération pour la période moyenne (A_{age}) entre le moment de libération et l'échouage de toutes les particules dans la section côtière j -th, g et f représentant les fonctions de réduction de masse unitaire, calculées par MEDSLIK, en fonction de l'âge des particules et des caractéristiques météorologiques marines, calculé pour le carburant marin (fuel oil) et pour un produit pétrolier typique couramment transporté dans cette région (Arabian Crude Oil).

Le hazard (HZ) a ensuite été calculé pour le j -ième segment côtier et pour chaque type de bateau en utilisant la formulation suivante

$$HZ_j^s = ID_j^s * A_{VD_j^s} * VO_j^s$$

$$VO_j^s = (n^s * VLO_j^s + m^s * VHO_j^s)$$

où, avec s indique la catégorie de bateau, k et m les poids utilisés pour répartir les hydrocarbures dispersés entre le mazout et les produits pétroliers par rapport au type de bateau ou des variables entre $k = m = 0,5$ pour les pétroliers (pétrole brut plus carburant), $k = 1$ et $m = 0$ pour les navires de charge et à passagers (carburant uniquement). Veuillez consulter Quattrocchi et al. (2021) pour une description détaillée de la méthodologie utilisée. La figure 6 montre les cartes des dangers obtenues pour l'année 2018 pour la zone de Bocche di Bonifacio.

METHODE DE CALCUL DES RISQUES Pour les côtes sablonneuses, il n'a pas été possible de définir les dégâts induits par une éventuelle marée noire car ils peuvent être estimés sauf par rapport aux aspects socio-économiques et donc purement liés à l'exploitation anthropique et aux pertes générées dans le secteur du tourisme. Nous avons ensuite procédé à une corrélation directe entre ces dommages et la vulnérabilité du littoral exprimée par l'indice ESI sans faire de distinction entre les côtes à forte et faible baignade et l'utilisation touristique. Dans tous les cas, la difficulté d'éliminer les hydrocarbures échoués, à la fois spontanés et mécaniques, a donc été considérée comme un indicateur des dommages potentiels induits par l'impact des hydrocarbures sur les côtes sablonneuses. En ce qui concerne les côtes rocheuses, les procédures décrites ci-dessus ont permis d'estimer la répartition spatiale des dommages induits par l'impact des hydrocarbures sur les écosystèmes circa-littoral. Compte tenu de cette prémisse, le risque a donc été défini comme un produit du hazard (HZ) pour le dommage (D):

$$RI_j^s = HZ_j^s * D_j$$

et calculé pour chaque section côtière et pour chaque catégorie de navires en utilisant pour D l'indice ESI pour les côtes sablonneuses et les dommages estimés sur une base écologique pour les côtes rocheuses. Cette procédure implique un processus de normalisation des deux facteurs par rapport aux valeurs maximales correspondantes.

Risultati

MAPPE DI RISCHIO PER LE BOCCHE DI BONIFACIO Applicando la metodologia precedentemente descritta sono state implementate le mappe di rischio di impatto di idrocarburi per l'area delle Bocche di Bonifacio per l'anno 2018 e per ognuna delle 3 categorie di imbarcazioni. In figura 7 sono riportati i risultati normalizzati suddivisi per le 3 aree di interesse corrispondenti al Golfo dell'Asinara, Bocche di Bonifacio e Golfo di Olbia.

Per quanto riguarda la categoria Passeggeri, pannelli superiori di figura 7, la valutazione del rischio individua valori particolarmente critici lungo specifici litorali dell'Arcipelago di La Maddalena e della parte settentrionale della Sardegna, inclusi alcuni siti nei pressi di Olbia. Per quanto riguarda la categoria Cargo, pannelli superiori di figura 7, rischio relativamente elevato si registra lungo i litorali del Golfo dell'Asinara e del Golfo di Olbia mentre sono di minore intensità in corrispondenza delle Bocche di Bonifacio. Infine dalla mappa di rischio di impatto di idrocarburi potenzialmente correlato al traffico di petroliere si individuano valori critici lungo il litorale del Golfo dell'Asinara con massimi in corrispondenza di Porto Torres e delle spiagge circostanti mentre le aree costiere delle Bocche di Bonifacio e del Golfo di Olbia i valori sono relativamente bassi.

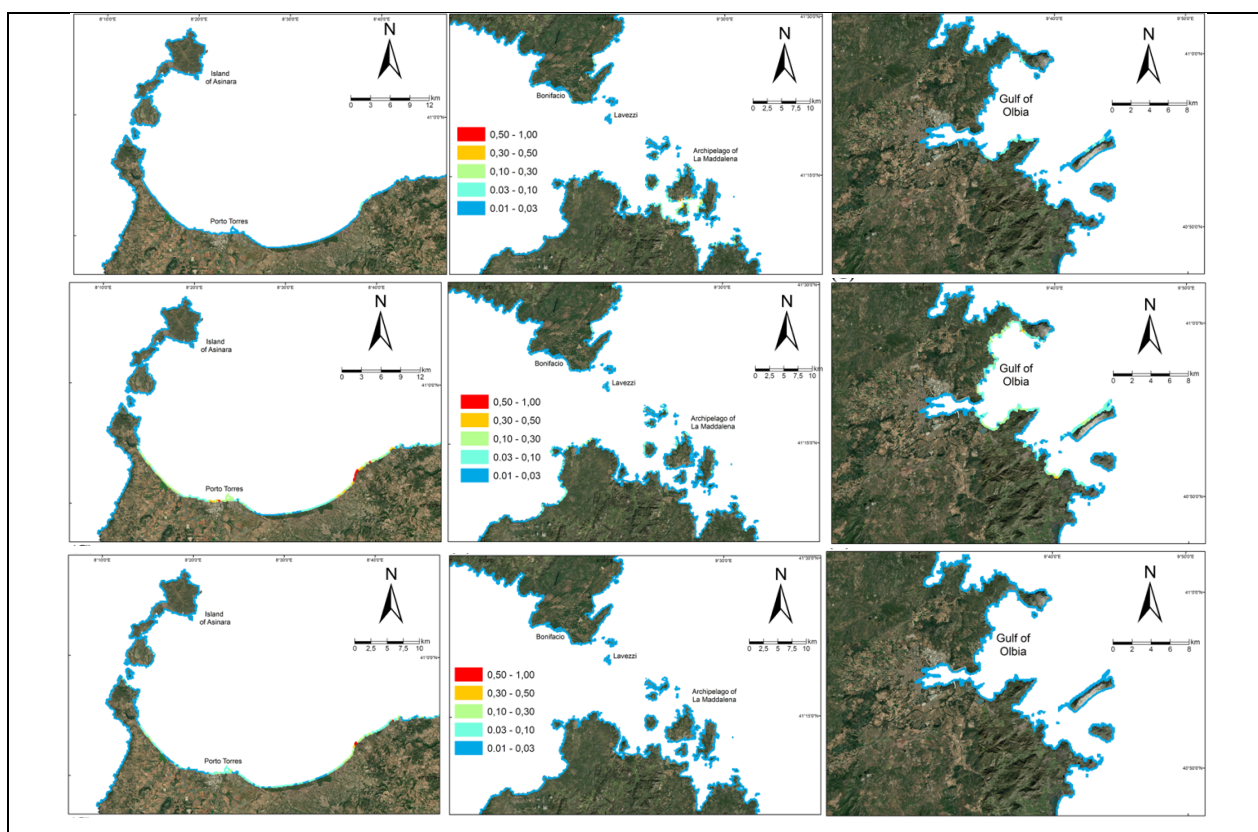
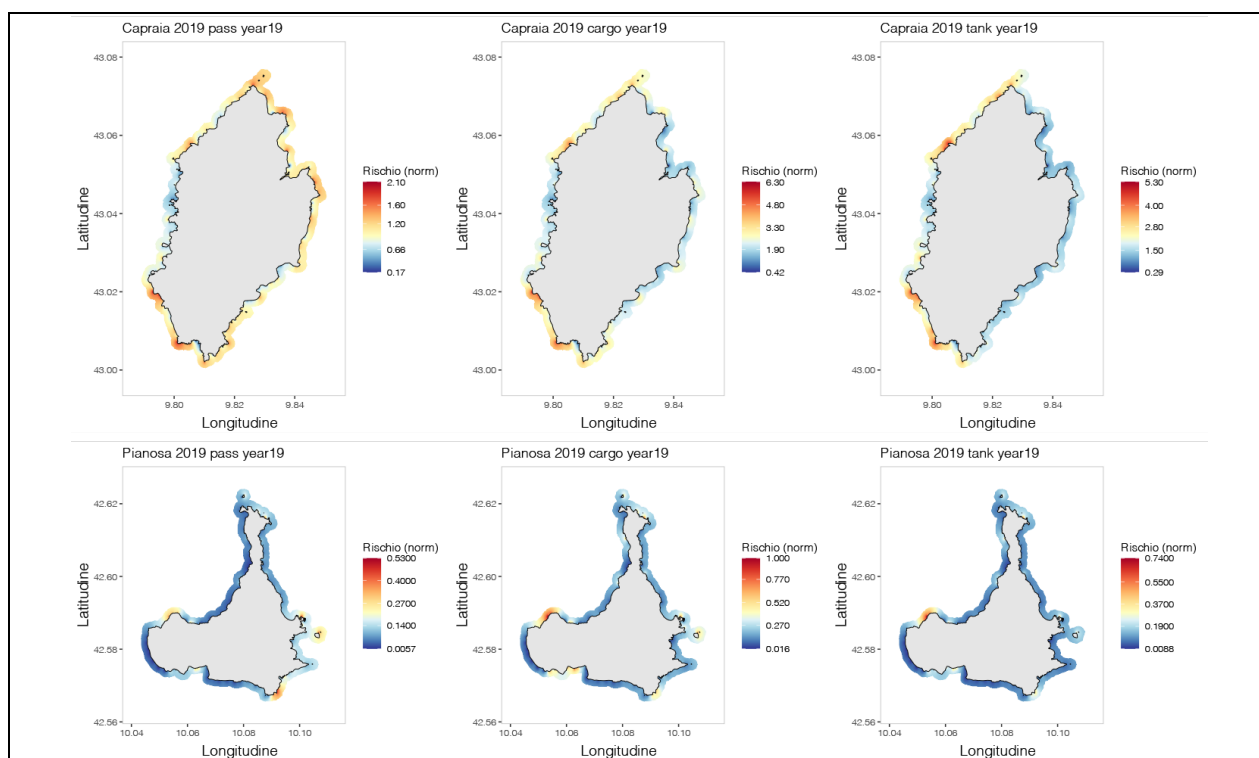
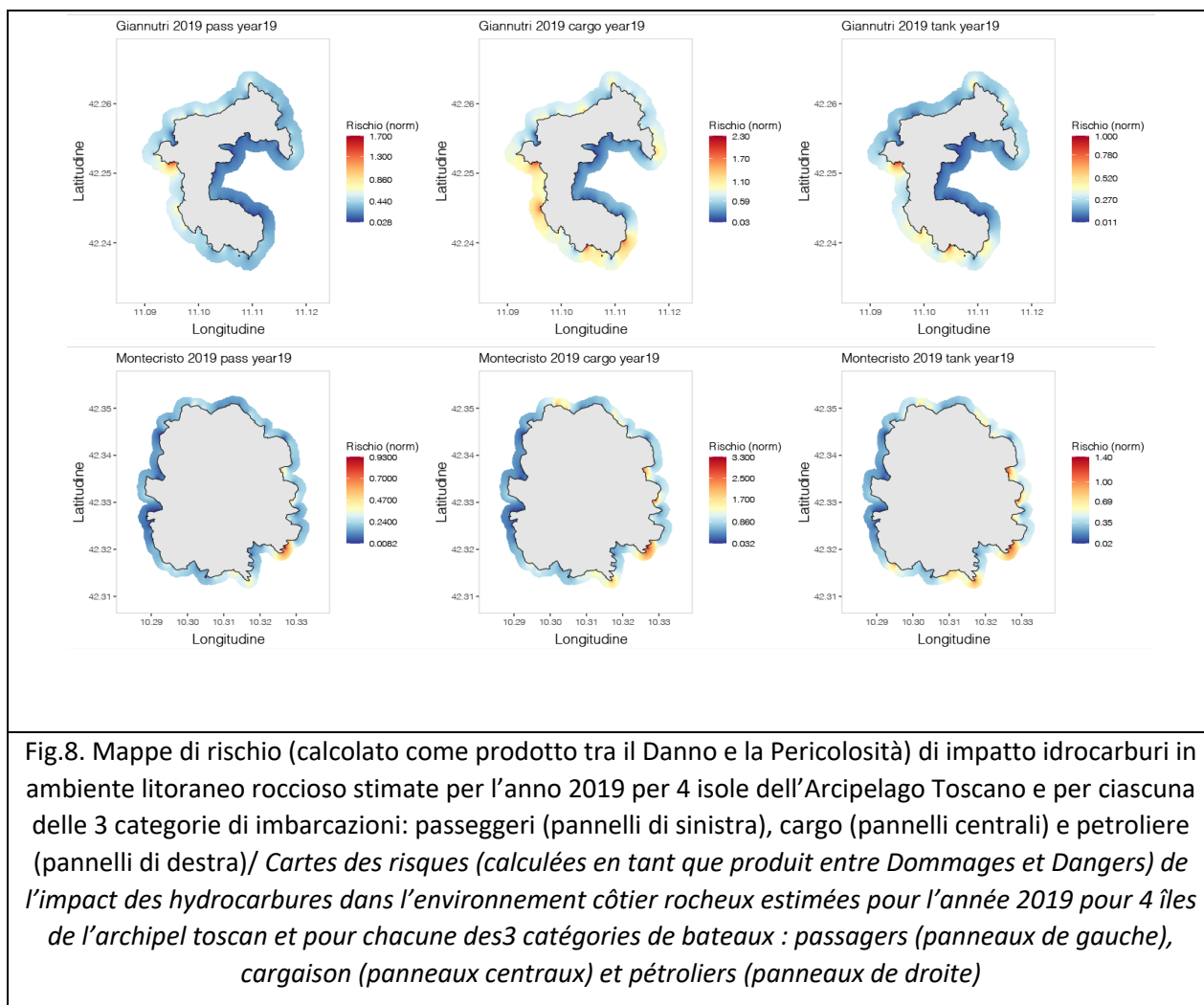


Fig.7. Mappe annuali di rischio di impatto idrocarburi in ambiente litoraneo sabbioso stimate per l'anno 2018 per le 3 categorie di imbarcazioni, passeggeri (pannelli superiori), cargo (pannelli centrali) e petroliere (pannelli inferiori) / *Cartes annuelles des risques d'impact des hydrocarbures dans l'environnement côtier sablonneux estimées pour l'année 2018 pour les 3 catégories de bateaux, passagers (panneaux supérieurs), cargaisons (panneaux centraux) et pétroliers (panneaux inférieurs)*

MAPPE DI RISCHIO PER L'ARCIPELAGO TOSCANO. Come per le Bocche di Bonifacio, sono state implementate le mappe di rischio di impatto di idrocarburi per l'area dell'Arcipelago Toscano per gli anni 2019 e 2020 per ognuna delle 3 categorie di imbarcazioni. Considerando le variazioni nei flussi marittimi a seguito della pandemia COVID19 come descritto nel paragrafo precedente, sono stati considerati come rappresentativi i soli dati relativi all'anno 2019. In figura 8 sono riportati i risultati normalizzati per categoria e suddivisi per le 4 aree di interesse corrispondenti alle isole di Capraia, Pianosa, Giannutri e Montecristo.

Per quanto riguarda la costa dell'isola di Capraia, (pannelli superiori di Figura 8) si individuano analogie tra le distribuzioni del rischio per le categorie Cargo e Petroliere con valori mediamente inferiori lungo le coste orientali e medio-occidentali e valori generalmente superiori per i litorali Nord e Sud Occidentali. Per la categoria passeggeri la distribuzione è più omogenea con indici di rischio superiori lungo tutti i litorali ad esclusione di quelli centro occidentali. I valori di rischio per i litorali dell'isola di Capraia, a parità di categoria e in relazione alle altre isole sono i più elevati. Per quanto riguarda l'isola di Pianosa si nota un'analogia nella distribuzione spaziale dell'indice di rischio per tutte e tre le categorie, con valori superiori in corrispondenza dell'estremo meridionale e in prossimità dei principali capi lungo la costa occidentale. Il rischio d'impatto è mediamente inferiore di 1/4 rispetto a quello calcolato per l'isola di Capraia. Una maggiore variabilità nella distribuzione del rischio si denota per i litorali dell'isola di Giannutri, laddove, seppur caratterizzata da valori medi, presenta elevati rischi di danno da idrocarburi in estesi tratti del litorale Sud occidentale per le categorie Cargo e Petroliere. Mentre per la categoria Passeggeri, i valori di rischio sono generalmente bassi e omogenei lungo tutto il litorale con aumenti localizzati in prossimità dei capi principali. Contrariamente, per il caso dell'isola di Montecristo, i risultati sono caratterizzati da una bassa variabilità spaziale dei valori di rischio per tutte le categorie con valori mediamente superiori per le categorie Cargo e Petroliere rispetto alla categoria passeggeri.





Résultats

CARTES DES RISQUES POUR LES BOUCHES DE BONIFACIO En appliquant la méthodologie décrite précédemment, les cartes des risques d'impact des hydrocarbures pour la zone du Bocche di Bonifacio pour l'année 2018 et pour chacune des 3 catégories de bateaux ont été mises en œuvre. La figure 6 montre les résultats normalisés divisés par les 3 zones d'intérêt correspondant au golfe de l'Asinara, au Bocche di Bonifacio et au Golfe d'Olbia.

En ce qui concerne la catégorie Passagers, panneaux supérieurs de la figure 7, l'évaluation des risques identifie des valeurs particulièrement critiques le long de côtes spécifiques de l'archipel de La Maddalena et de la partie nord de la Sardaigne, y compris certains sites près d'Olbia. En ce qui concerne la catégorie Cargo, panneaux



Interreg



UNIONE EUROPEA



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

supérieurs de la figure 7, un risque relativement élevé est enregistré le long des côtes du golfe de l'Asinara et du Golfe d'Olbia alors qu'elles sont de moindre intensité dans le détroit de Bonifacio. Enfin, à partir de la carte des risques d'impact des hydrocarbures potentiellement liés au trafic de pétroliers, des valeurs critiques sont identifiées le long de la côte du golfe de l'Asinara avec des maximums à Porto Torres et les plages environnantes tandis que les zones côtières du détroit de Bonifacio et du Golfe d'Olbia les valeurs sont relativement faibles.

CARTES DES RISQUES POUR L'ARCHIPEL TOSCAN. En ce qui concerne le détroit de Bonifacio, des cartes des risques d'impact d'hydrocarbures ont été mises en œuvre pour la région de l'archipel toscan pour les années 2019 et 2020 pour chacune des 3 catégories de bateaux. Compte tenu des changements dans les flux maritimes à la suite de la pandémie de COVID19 tels que décrits dans le paragraphe précédent, seules les données relatives à l'année 2019 ont été considérées comme représentatives. La figure 8 montre les résultats normalisés par catégorie et divisés par les 4 zones d'intérêt correspondant aux îles de Capraia, Pianosa, Giannutri et Montecristo.

En ce qui concerne la côte de l'île de Capraia, (panneaux supérieurs de la figure 8), des similitudes sont identifiées entre les répartitions des risques pour les catégories cargo et Pétrolier avec des valeurs moyennes plus faibles le long des côtes est et centre-ouest et des valeurs généralement plus élevées pour les côtes nord et sud-ouest. Pour la catégorie passagère, la répartition est plus homogène avec des indices de risque plus élevés le long de toutes les côtes, à l'exception des côtes du centre-ouest. Les valeurs de risque pour les côtes de l'île de Capraia, avec la même catégorie et par rapport aux autres îles, sont les plus élevées. En ce qui concerne l'île de Pianosa, il existe une analogie dans la distribution spatiale de l'indice de risque pour les trois catégories, avec des valeurs plus élevées à l'extrême sud et près des caps principaux le long de la côte ouest. Le risque d'impact est en moyenne 1/4 inférieur à celui calculé pour l'île de Capraia. Une plus grande variabilité dans la répartition des risques est évidente pour les côtes de l'île de Giannutri, où, bien que caractérisée par des valeurs moyennes, elle présente des risques élevés de dommages causés par les hydrocarbures dans de vastes étendues de la côte sud-ouest pour les catégories Cargo et Pétroliers. Alors que pour la catégorie Passagers, les valeurs de risque sont généralement faibles et homogènes sur l'ensemble de la côte avec des augmentations situées près des têtes principales. Inversement, pour le cas de l'île de Montecristo, les résultats se caractérisent par une faible variabilité spatiale des valeurs de risque pour toutes les catégories avec des valeurs en moyenne plus élevées pour les catégories Cargo et Pétrolier que pour la catégorie Passagers.

Bibliografia / Bibliographie

- Abdulla, A., Linden, O., (2008). Maritime Traffic Effects on Biodiversity in the Mediterranean Sea, Volume 1 – Review of Impacts, Priority Areas and Mitigation Measures. IUCN (Malaga)
- Campana I, Angeletti D., Crosti R., Luperini C., Ruvoletto A., Alessandrini A., Arcangeli A. (2017). Seasonal characterisation of maritime traffic and the relationship with cetacean presence in the Western Mediterranean Sea. *Mar. Pollut. Bull.* 115, 282-291
- Canu, D. M., Solidoro, C., Bandelj, V., Quattrocchi, G., Sorgente, R., Olita, A., et al. (2015). Assessment of oil slick hazard and risk at vulnerable coastal sites. *Mar. Pollut. Bull.* 94, 84–95.



Interreg



UNIONE EUROPEA



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

- Coll, M., Piroddi, C., Albouy, C., Ben Rais Lasram, F., Cheung, W.W.L., Christensen, V., Karpouzi, V.S., Guilhaumon, F., Mouillot, D., Paleczny, M., Palomares, M.L., Steenbeek, J., Trujillo, P., Watson, R., Pauly, D., (2012). The Mediterranean Sea under siege: spatial overlap between marine biodiversity, cumulative threats and marine reserves. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 21:465–480.
- Cucco, A., Sinerchia, M., Lefrançois, C., Magni, P., Ghezzi, M., Umgieser, G., et al. (2012). A high-resolution real-time forecasting system for predicting the fate of oil spills in the Strait of Bonifacio (western Mediterranean Sea). *Ecol. Modell.* 64, 1186–1200. doi:10.1016/j.ecolmodel.2009.01.008.
- European Environmental Agency (2005) <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/geomorphology-geology-erosion-trends-and-coastal-defence-works> [Accessed March 01, 2020]
- European Maritime Safety Agency (2019) <http://www.emsa.europa.eu/news-a-press-centre/external-news/item/3775-traffic-density-maps-for-a-better-understanding-of-maritime-traffic.html> [Accessed March 01, 2020].
- Kleissen, F. M., Arentz, L., Reed, M., and Johansen, O. (2007). Marine Environmental Risk Assessment System: Conceptual design and preliminary demonstration for the Dutch Continental Shelf: Demo A: inventory, classification and risk assessment of oil transport on the North Sea. Z4339.
- Lahr, J., and Kooistra, L. (2010). Environmental risk mapping of pollutants: state of the art and communication aspects. *Sci. Total Environ.* 408, 3899–3907.
- Pennino, M.G., Pérez Roda, M.A., Pierce, G.J., Rotta, A., (2016). Effects of vessel traffic on relative abundance and behaviour of cetaceans: the case of the bottlenose dolphins in the Archipelago de La Maddalena, north-western Mediterranean Sea. *Hydrobiologia* 776:237–248.
- G. Quattrocchi, S. Simeone, A. Pes, R. Sorgente, A. Ribotti, A.Cucco, (2021). An operational numerical system for oil stranding risk assessment in a high-density vessel traffic area. *Front. Mar. Sci.*, 8, 585396
- Regione Sardegna Geoportale (2020) http://www.sardegnageoportale.it/webgis2/sardegna/mape/?map=download_raster [Accessed March 01, 2020]
- REMPEC, 2008. Study of Maritime Traffic Flows in the Mediterranean Sea e Final Report. <http://docshare02.docshare.tips/files/5651/56517843.pdf>
- Ritter, F., and Panigada, S. (2019). “Collisions of Vessels With Cetaceans—The Underestimated Threat,” in *World Seas: an Environmental Evaluation* (Elsevier), 531–547.
- Roland, A., Cucco, A., Ferrarin, C., Hsu, T.-W., Liao, J.-M., Ou, S.-H., et al. (2009). On the development and verification of a 2-D coupled wave-current model on unstructured meshes. *J. Mar. Syst.* 78, S244–S254. doi:10.1016/j.jmarsys.2009.01.026.
- Salter, J. (1997). Risk management in a disaster management context. *J. Contingencies Cris. Manag.* 5, 60–65.



Interreg



UNIONE EUROPEA



MARITTIMO-IT F R-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

- Umgiesser, G., Canu, D. M., Cucco, A., and Solidoro, C. (2004). A finite element model for the Venice Lagoon. Development, set up, calibration and validation. *J. Mar. Syst.* 51, 123–145.
- Zodiatis, G., Lardner, R., Hayes, D., Georgiou, G., Pinardi, N., De Dominicis, M., Panayidou, X., (2008). The Mediterranean oil spill and trajectory prediction model in assisting the EU response agencies. in: Congreso Nacional de Salvamento en la Mar, Cadiz, 2-4 October, libro de actas, 535–547.