

Sistema integrato di previsione marina a supporto delle decisioni per il contenimento degli impatti di idrocarburi in mare

Roberto Sorgente, Marco Arrigo, Andrea Cucco, Dario La Guardia,
Gennaro Oliva, Angelo Perilli, Andrea Pes, Federica Pessini, Giovanni Quattrocchi,
Alberto Ribotti, Alessandro Signa, Antonia Di Maio



©Cnr Edizioni, 2021

P.le Aldo Moro 7

00185 Roma

ISBN versione digitale: 978-88-8080-464-2

Sistema integrato di previsione marina a supporto delle decisioni per il contenimento degli impatti di idrocarburi in mare

Roberto Sorgente¹, Marco Arrigo², Andrea Cucco¹, Dario La Guardia², Gennaro Oliva³, Angelo Perilli¹, Andrea Pes¹, Federica Pessini¹, Giovanni Quattrocchi¹, Alberto Ribotti¹, Alessandro Signa², and Antonia Di Maio⁴

¹*CNR - Istituto per lo studio del impatti Antropici e Sostenibilità in ambiente marino, Oristano*

²*CNR - Istituto per le Tecnologie Didattiche, Palermo*

³*CNR - Istituto di Calcolo e Reti ad Alte Prestazioni, Napoli*

⁴*CNR - Istituto per lo studio del impatti Antropici e Sostenibilità in ambiente marino, Roma*

Sommario

Questo e-book è una guida all'utilizzo dell'interfaccia web denominata SOS-Piattaforme e si rivolge al personale del Comando Generale delle Capitanerie di Porto. Sviluppata come strumento di supporto alla gestione di emergenze ambientali dovute a sversamenti di idrocarburi in mare, permette di “dialogare” con un complesso sistema di modelli *matematici*, capace di realizzare scenari di simulazione numerica della dispersione, trasporto e trasformazione degli idrocarburi in mare.

1 Introduzione

L'intenso traffico navale e le numerose installazioni legate all'industria petrolifera rappresentano senza dubbio un importante fattore di rischio per il mar Mediterraneo (Zodiatis et al., 2016); si stima che, pur occupando meno dell'1% delle acque della Terra e solo lo 0.3% del suo volume, questo mare sia interessato dal 33% del traffico mondiale di petrolio (360 milioni di ton/anno), dal 15% dell'attività navale del mondo, dal 10% di traffico pesante (navi commerciali di stazza elevata), da circa 450 tra porti e terminali, da una media di 60 incidenti marittimi all'anno di cui il 25% con sversamenti di sostanze chimiche e di petrolio, da sversamenti illegali e frequenti di acque di sentina (Shami et al. (2017), Garcia et al. (2013), Farnesina (2017), Ferraro et al. (2009)). Allo stesso tempo la vulnerabilità del Mare Mediterraneo, con i suoi 46000 km di coste, di cui 7500 km italiane, è elevata: si stima infatti che ospiti circa l'8% della biodiversità del mondo, in termini di tipologia e ricchezza di ecosistemi (Shami et al. (2017), Olson and Dinerstein (1998), EEA (2015)).

Secondo le stime del 2017, il 70% del petrolio importato in Italia proviene da aree mediterranee (Medio Oriente, Mar Caspio e Nord Africa); si aggiunga che il nostro Paese è il più grande centro di raffinazione d'Europa, con 11 raffinerie attive, 7 piattaforme estrattive e 14 porti equipaggiati per scarico del greggio (Farnesina (2017), Garcia et al. (2013), MISE (2020)).

Tutti questi numeri mostrano quanto sia importante, dal punto di vista ambientale, ma anche socio-economico, gestire correttamente gli eventi di sversamento di petrolio (*oil spill*), quantificando il *Rischio*, espresso in termini di *Pericolosità*

e *Vulnerabilità* (Garcia et al., 2013).

Il successo delle azioni d'intervento finalizzate a contenere e/o mitigare gli impatti di eventuali *oil spill* in mare è strettamente connesso alla capacità di rilevare tempestivamente la macchia (*slick*) e di prevederne l'evoluzione nello spazio e nel tempo ((Ribotti et al., 2019)). Questo obiettivo non può prescindere dalla stima dello spostamento (*spreading*) della macchia e dei suoi processi di trasformazione chimico-fisici, noti come processi di *weathering*; allo stesso tempo la conoscenza dei forzanti meteo-marini risulta essere di essenziale importanza. Tutte queste informazioni provengono dai modelli numerici, la cui attendibilità è notevolmente migliorata negli ultimi anni grazie all'incremento tecnologico e relativo trasferimento agli operatori di settore, favoriti entrambi dai progetti che finanziano la ricerca scientifica.

Al fine di supportare gli enti preposti alla gestione di queste emergenze ambientali, il Ministero dell'Ambiente e Tutela del Territorio e del Mare (**MATTM**) e il Consiglio Nazionale delle Ricerche (**CNR**) nel 2016 hanno stipulato la Convenzione **SOS-Piattaforme e Impatti Off-Shore**. Uno degli obiettivi della convenzione è la realizzazione di un servizio sperimentale di previsione numerica dei potenziali sversamenti nei mari italiani, attraverso la realizzazione di previsioni numeriche (scenari) che mostrano la loro evoluzione a mare (*oil fate*).

Il sistema di previsione è stato realizzato dall'Istituto per lo Studio degli impatti Antropici e Sostenibilità in ambiente marino (**IAS-CNR**, sede di **Oristano** e sede di **Roma**) e si compone di due principali moduli: il primo è il sistema di previsione numerica (SPN), composto dal modello di previsione dello stato del mare (circolazione marina) e dal modello di dispersione e trasformazione degli *oil spill*; il secondo è rappresentato dalla Graphical User Interface (GUI), realizzato dall'Istituto delle Tecnologie Didattiche di Palermo (*ITD-CNR*). La GUI permette di "dialogare" via web con il modulo SPN per la previsione dell'evoluzione di un eventuale sversamento rilasciato alla superficie del mare. Questo è ottenuto tramite l'elaborazione computazionale di complessi modelli matematici che descrivono i principali processi chimico-fisici di uno sversamento e la sua interazione con le condizioni ambientali, quali dinamica marina e atmosferica (per maggiori approfondimenti si rimanda a Sorgente et al. (2020)). La conoscenza della soluzione numerica dei modelli permette di ottenere una stima dello spostamento dello sversamento, dei tempi di degradamento del composto inquinante e

dell'eventuale suo impatto sulla costa. Questo consente agli enti preposti di valutare possibili strategie ed eventuali azioni mirate al contenimento dell'impatto sulla costa e nell'ambiente marino.

2 Principali caratteristiche chimico-fisiche

Gli **idrocarburi** costituiscono una vasta classe di composti organici contenenti atomi di carbonio e idrogeno e, a seconda del tipo di legami chimici presenti nella molecola, possono essere suddivisi in due grandi categorie: *alifatici* e *aromatici*. Invece il **petrolio greggio** è una miscela complessa composta da diversi idrocarburi presenti in percentuali molto variabili; i componenti vengono distinti in base al loro peso e raggruppati in tre grandi categorie: leggeri, medi e pesanti.

I **componenti leggeri** rappresentano il 95% della frazione solubile del petrolio e sono costituiti da idrocarburi alifatici, contenenti fino a 10 atomi di carbonio, e da idrocarburi monoaromatici. Sono caratterizzati da:

- punto di ebollizione che arriva al massimo a 150°C;
- rapida e completa evaporazione (entro un giorno);
- solubilità più elevata (pochi mg/l).

I **componenti medi** sono idrocarburi alifatici contenenti da 11 a 22 atomi di carbonio (alcani facilmente biodegradabili), diaromatici (naftalene) e poliaromatici (fenantrene, antracene, ecc.). Sono caratterizzati da:

- punto di ebollizione compreso tra 150 e 400°C;
- bassa velocità di evaporazione (diversi giorni);
- bassa solubilità in acqua (pochi mg/l);
- facilmente biodegradabili;

I **componenti pesanti** sono idrocarburi contenenti 23 o più atomi di carbonio. Sono i composti più persistenti e sono caratterizzati da :

- bassa velocità di degradazione;
- minima perdita per evaporazione;
- minima solubilità;
- persistenza a lungo termine nei sedimenti sotto forma di grumi di catrame o pavimenti di asfalto.

Per indicare il peso specifico o la densità di una miscela idrocarburica liquida

(ad esempio greggio o gasolio), solitamente si usa il **grado API** ($^{\circ}\text{API}$), sviluppato dall'*American Petroleum Institute* (il principale ente professionale USA nel campo chimico e petrolchimico). Il $^{\circ}\text{API}$ viene utilizzato per indicare il peso specifico della miscela e misurare la qualità del greggio: tanto più è leggero, tanto maggiore è la sua qualità, risultando privo di residui, specie a base di zolfo.

Il grado API è rappresentato di solito secondo la seguente equazione:

$$^{\circ}\text{API} = \frac{141.5}{SG} - 131.5$$

dove SG rappresenta la gravità specifica della miscela (cioè la sua densità rispetto a quella dell'acqua) calcolata alla temperatura di 60°F ($\equiv 15.5^{\circ}\text{C}$). Pertanto, una miscela idrocarburica è detta:

- **pesante, *heavy oil***: per $11 < ^{\circ}\text{API} < 25^{\circ}$;
- **media, *medium oil*** : per $26 < ^{\circ}\text{API} < 35^{\circ}$;
- **leggera, *light oil***: per $^{\circ}\text{API} > 35^{\circ}$;

La conoscenza del grado API è, pertanto, di fondamentale importanza, perché il suo valore è inversamente proporzionale a quello della densità relativa, la quale determina la tendenza all'affondamento. Maggiore è la densità relativa (minore $^{\circ}\text{API}$), maggiore è la tendenza ad affondare, quindi, in termini di grado API, sino al $^{\circ}\text{API}$ 10 gli idrocarburi possono affondare. Nella Figura 1 sono rappresentati gli intervalli più comunemente utilizzati.

Un altro parametro fondamentale è la *viscosità*, che esprime la resistenza allo scorrimento; da essa dipende la capacità degli idrocarburi di disperdersi nella colonna d'acqua e formare emulsioni. Tanto maggiore è la *viscosità*, tanto minore sarà la velocità di dispersione nella colonna d'acqua e tanto maggiore sarà la tendenza a formare emulsioni; viceversa, minore sarà la viscosità e maggiore sarà la sua capacità di disperdersi nella colonna d'acqua.

3 Processi di trasformazione e dispersione

In seguito ad un evento di *Oil Spill*, le sostanze inquinanti si disperdono sulla superficie del mare formando una pellicola molto sottile, uno *slick*, la cui forma si modifica nel tempo a seguito di una serie di trasformazioni fisiche, chimiche e

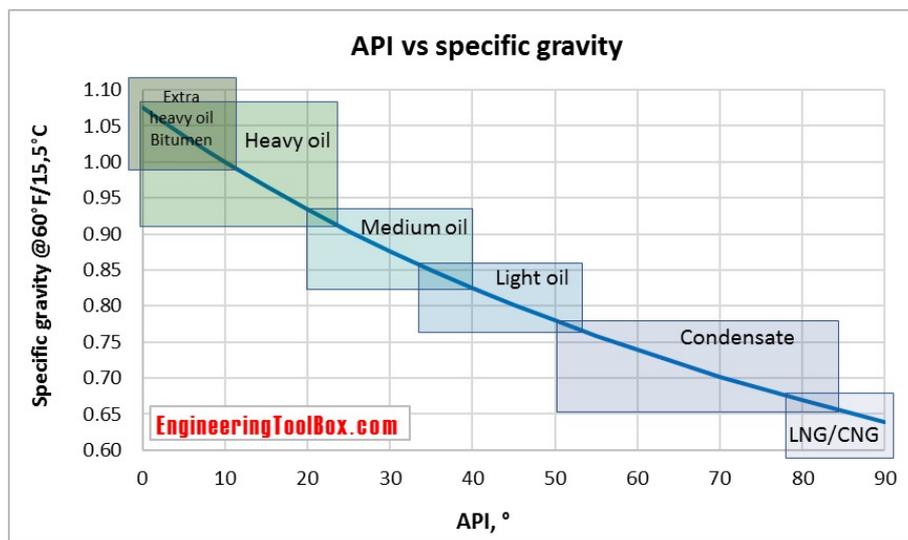


Fig. 1: Distribuzione delle classi °API in funzione della gravità specifica (fonte: <https://www.engineeringtoolbox.com>).

biologiche, noti come processi di *weathering*, rappresentati in Figura 2. I fattori che influiscono maggiormente sul comportamento di idrocarburi in mare sono:

- le caratteristiche fisiche degli idrocarburi, in particolare viscosità e densità;
- la composizione e le caratteristiche chimiche degli idrocarburi;
- le condizioni meteo-marine (stato del mare e dell'atmosfera);
- le caratteristiche dell'acqua del mare (temperatura, presenza di batteri, nutrienti e ossigeno disciolto);

Ritenendo importante conoscere i processi di trasformazione e di dispersione dell'olio in mare e come essi interagiscono e alterano la natura della sostanza inquinante, ne viene fatta di seguito una breve descrizione, anche rappresentati in Figura 2.

- **Propagazione o diffusione, *spreading*:** subito dopo lo sversamento, in assenza di azioni meccaniche esterne, gli idrocarburi iniziano a propagarsi sulla superficie del mare sotto l'influenza delle tensioni superficiali che agiscono all'interfaccia e di altri fattori fisico-chimici. La velocità è strettamente dipendente dalla loro stessa viscosità. Idrocarburi con bassa viscosità si espandono più velocemente di quelli a viscosità superiore. La propagazione raramente è uniforme ed è quindi possibile osservare variazioni nello spessore dell'inquinante. La dimensione della macchia che si crea a seguito dello sversamento in mare dipende,

oltre che dalla viscosità, anche dalla quantità dello sversamento e dalle forzanti esterne, come le condizioni meteo-marine (intensità del vento e delle correnti marine).

- **Evaporazione, *evaporation***: contemporaneamente alla diffusione, sulla superficie marina, inizia il processo di evaporazione, in forza della volatilità degli idrocarburi che compongono la miscela. È il principale processo responsabile della rimozione di idrocarburi dalla superficie del mare, tanto più rapido quanto maggiore è la percentuale di elementi leggeri e volatili. Un'intensa evaporazione è favorita dal vento forte, turbolenza del mare, alte temperature e grande dimensione della macchia; in questi casi si formano frazioni di greggio residue con valori di densità e viscosità più alti, avendo perso la frazione leggera. - **Dispersione, *dispersione***: questo processo può intervenire contemporaneamente alla diffusione e consiste nella rottura parziale o totale della macchia in frammenti e gocce di dimensioni variabili che formano un miscuglio nella parte alta della colonna d'acqua e sono generati sotto l'azione delle onde e della turbolenza. Tali goccioline restano sospese nella colonna d'acqua o ritornano in superficie in base alle differenze tra la loro densità e quella dell'acqua e in funzione delle dimensioni delle goccioline stesse. La velocità alla quale avviene la dispersione dipende principalmente dalla natura degli idrocarburi e dallo stato del mare. La dispersione è più veloce se gli idrocarburi sono più leggeri e a bassa viscosità e se il mare è molto agitato.

- **Emulsificazione, *emulsification***: è il processo mediante il quale le goccioline d'acqua di mare si trovano sospese sugli idrocarburi come conseguenza del mescolamento turbolento della superficie del mare. Si formano masse viscide di varia dimensione che galleggiando possono arrivare sulla costa.

- **Dissoluzione, *dissolution***: i componenti più leggeri che formano gli idrocarburi possono essere dissolti nell'acqua di mare. I composti più solubili sono gli idrocarburi aromatici come il benzene o il toluene, i quali sono anche i primi ad essere persi attraverso l'evaporazione.

- **Ossidazione, *oxidation***: l'inquinante reagisce chimicamente con l'ossigeno disgregandosi in prodotti solubili o formando composti persistenti: il catrame, originatosi dall'ossidazione di stati d'olio ad elevata viscosità. E' la luce del sole ad essere la principale responsabile di questo processo che dipende dal tipo di olio e dalla sua evaporazione alla luce. È, in ogni caso, un evento molto lento.

- **Sedimentazione, *sedimentation***: molti composti degli idrocarburi hanno una densità elevata tale da affondare nell'ambiente marino. Tale affondamento è dovuto all'adesione degli idrocarburi a particelle di sedimento o di sostanza organica.

- **Biodegradazione, *biodegradation***: l'acqua di mare contiene un range di microrganismi marini (es. batteri) che possono utilizzare gli idrocarburi come fonte di energia degradandoli parzialmente o completamente. I principali fattori che determinano la biodegradazione sono: il livello di nutrienti nell'acqua (nitriti e fosfati); la temperatura dell'acqua; il livello di ossigeno presente. La biodegradazione è favorita dall'aumento della temperatura e dal contatto tra le molecole di acqua e quelle degli idrocarburi; inoltre è un processo che richiede ossigeno, di conseguenza può avvenire solo all'interfaccia idrocarburi-acqua dato che non vi è ossigeno all'interno dell'inquinante stesso.

Tali processi si influenzano reciprocamente, poiché il tasso di evaporazione influisce sull'aumento della densità della miscela residua e, quindi, sulla sua tendenza ad affondare; l'entità della dispersione nella colonna d'acqua, invece, determina la velocità di biodegradazione; l'ossidazione e l'emulsificazione determinano la persistenza del prodotto sversato nell'ambiente marino.

I processi di propagazione, evaporazione, dispersione, emulsificazione e dissoluzione sono quelli più importanti durante le prime fasi di uno sversamento, mentre l'ossidazione, la sedimentazione e la biodegradazione determinano il destino finale dell'olio. Gli idrocarburi che sedimentano sul fondo del mare sono quelli più dannosi per l'ecosistema marino: analisi condotte sui sedimenti di una spiaggia inquinata hanno evidenziato che alcune componenti idrocarburiche rimangono inalterate per molti anni interferendo con la vita sia degli organismi superiori che dei microrganismi.

4 Gli effetti sull'ambiente

L'impatto di uno sversamento sull'ambiente marino è legato alla probabilità che le sostanze inquinanti raggiungano la costa. In generale, un consistente sversamento produce **grandi** effetti nel breve termine e **cronici** nel lungo periodo sugli organismi marini (in particolare uova o piccoli pesci), sui crostacei, sullo zooplancton, che rappresenta la principale fonte di cibo per i pesci, sugli inver-

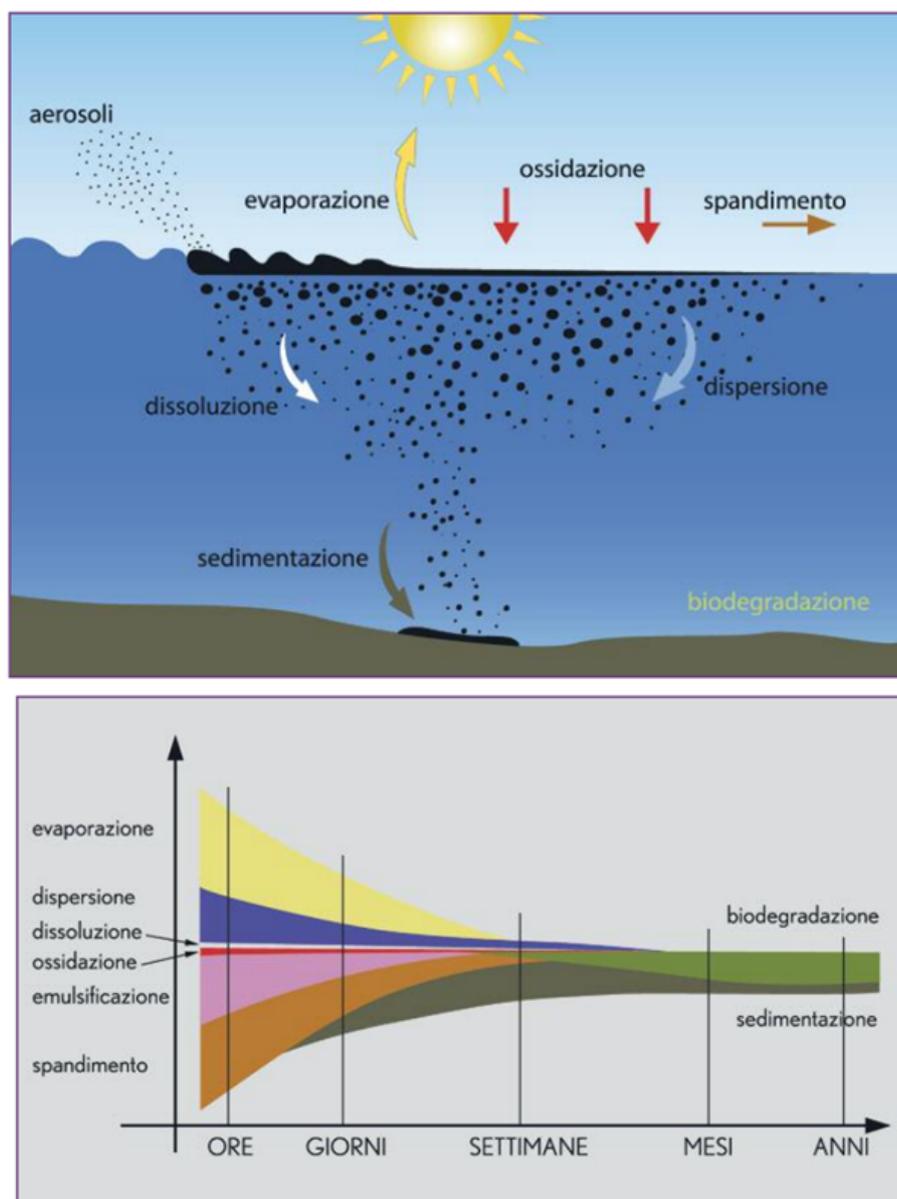


Fig. 2: Rappresentazione dei principali processi di weathering (figura in alto) e scala temporale (figura in basso). Fonte ITOPF (<https://www.itopf.org/>).

tebrati filtratori (coralli, spugne, anemoni di mare, bivalvi, etc.) e sull'avifauna che viene a contatto con gli stati oleosi galleggianti. Si hanno effetti acuti quando il petrolio viene immesso in mare e forma una prima sottile pellicola, causando una serie di effetti negativi. Essa impedisce gli scambi gassosi all'interfaccia aria-mare; limita la penetrazione della luce in profondità, limitando quindi l'attività fotosintetica di organismi vegetali e diminuendo la produzione primaria; aderisce agli organismi che vivono all'interfaccia (mammiferi marini, uccelli, organismi bentonici intertidali, alghe, etc.) impedendone le normali funzioni vitali.

Analizzando invece gli effetti cronici, questi si verificano quando la tossicità negli organismi rimane ad un livello subletale, anche se le sostanze inquinanti presenti provocano delle sostanziali alterazioni chimico-fisiche. Si possono riscontrare alterazioni fisiologiche, fisiche e comportamentali quali modificazioni della composizione in specie e modificazioni delle alterazioni fisiologiche (esempio: predatore).

Gli impatti arrecati da uno sversamento sull'ecosistema marino sono condizionati da diversi fattori:

- **Tipo di petrolio:** i greggi e i prodotti petroliferi differiscono notevolmente per la loro tossicità. Tale parametro si riduce in maniera inversamente proporzionale al tempo di permanenza del petrolio in mare, di conseguenza uno sversamento che raggiunge rapidamente una spiaggia può provocare effetti più tossici di quello che, prima di arenarsi, subisce per giorni l'azione degli agenti meteomarinari. Da numerosi esperimenti condotti su piante ed animali, si è dedotto che effetti gravi sono associati a composti a basso punto di ebollizione (esempio aromatici); il più grave danno tossico è causato da sversamento di petrolio leggero, soprattutto se confinato in una piccola area. Sversamenti di olio pesante, invece, possono ricoprire tratti di spiaggia e uccidere gli organismi presenti per soffocamento o effetti tossici acuti.

- **Quantità di petrolio:** in presenza di un elevato quantitativo di petrolio sversato, può aumentare la penetrazione entro i sedimenti: cresce in questo caso la probabilità che le masse oleose, aggregando pietrisco e ghiaia nel processo di solidificazione, formino strati duri e persistenti. Questi pavimenti asfaltati permangono più a lungo sulla zona di retrospiaggia ove possono costruire una barriera fisica che ostacola la ricolonizzazione di piante e arbusti. Dopo uno sversamento, la rimozione in massa del petrolio effettuata da squadre di intervento

può accelerare in alcuni casi il ripristino, riducendo l'effetto soffocamento delle specie biologiche e la possibilità di formazione di pavimenti asfaltati.

- **Fattori geomorfologici:** in mare aperto è più facile che il petrolio si disperda apportando quindi un danno ecologico più limitato. A ridosso delle coste, invece, il danno può rivelarsi più pronunciato in acque basse di baia ed insenature protette, dove la concentrazione di petrolio nell'acqua può raggiungere livelli maggiori rispetto al mare aperto.

Il petrolio che raggiunge le coste può andare incontro a diversi destini, provocando una serie di effetti condizionati da due importanti fattori: il livello di energia della costa (grado di esposizione al moto ondoso) e il tipo di substrato. Su coste rocciose esposte, le forme di vita costiera subiscono effetti dannosi minimi con tempi di ripristino delle condizioni di normalità brevi, poiché il petrolio non aderisce facilmente su questo tipo di superficie e, nel caso avvenga, esso viene rapidamente rimosso dall'azione del moto ondoso. L'elevata persistenza del petrolio si ha, invece, sulle biomasse algali, dove è probabile il suo intrappolamento. Le aree litorali più riparate sono, in genere, quelle con sedimenti sabbiosi, oppure con battigia fangosa: tra di esse vi sono le paludi costiere e le aree umide. Tali zone possiedono un'alta produttività biologica ma rappresentano anche le peggiori trappole per il petrolio e, per questo motivo, sono oggetto di particolare attenzione quando avviene uno sversamento.

- **Condizioni atmosferiche:** la temperatura e la velocità del vento influiscono sulla riduzione della tossicità del petrolio perché ne favoriscono l'evaporazione. La temperatura, in particolare, influisce sulla viscosità del petrolio e quindi c'è la tendenza sia alla dispersione che alla sedimentazione. Inoltre, essa, insieme all'apporto di ossigeno e di sostanze nutritive, determina il ritmo di degradazione microbica, che rappresenta il destino ultimo del petrolio nell'ambiente.

- **Fattori biologici:** le varie specie viventi hanno differenti sensibilità. Per esempio, molte alghe marine sono abbastanza resistenti, probabilmente a causa del loro rivestimento mucillaginoso e dall'azione di ripulitura delle maree.

4.1 Il modello di dispersione e trasformazione degli idrocarburi

La previsione numerica dell'evoluzione spazio/temporale di una chiazza di idrocarburo dispersa in mare è funzione di diversi variabili, legate principalmente alla stima dello stato del mare (correnti ed onde) e alle condizioni meteorologiche. Una modellazione matematico/numerica del fenomeno deve tenere conto dell'interazione di tutte queste componenti, al fine di consentire una corretta rappresentazione dell'evoluzione dell'evento. In generale, i processi di trasporto, diffusione e trasformazione dell'idrocarburo in mare possono essere simulati numericamente mediante un modello Lagrangiano, che consente una rappresentazione della traiettoria delle particelle costituenti l'inquinante in funzione dello spazio e del tempo. Questo viene accoppiato a modelli di circolazione Euleriani, che definiscono le proprietà del mare come la temperatura, salinità, direzione ed intensità della corrente in punti fissi di un grigliato di calcolo.

La stima della traiettoria dello spostamento di una macchia d'idrocarburo, della sua concentrazione e dei relativi processi di trasformazione può essere ottenuta mediante l'utilizzo del modello *oil spill* denominato MEDSLIK.II (De Dominicis et al., 2013). Esso necessita del campo di corrente e di vento, assieme alle informazioni legate ad uno specifico evento inquinante; a partire da questi dati il modello di *oil spill* è in grado di riprodurre l'evoluzione nello spazio e nel tempo della concentrazione dell'idrocarburo e di fornire una stima anche dei processi di evaporazione, di dispersione nella colonna d'acqua e di deposizione sulla costa e sul fondo del mare. La previsione dell'evoluzione della posizione e della concentrazione di una macchia di olio però non può prescindere dalla conoscenza della previsione dell'avvezione del campo idrodinamico. Con l'avvento dell'oceanografia operativa (Pinardi and Coppini, 2010) è stato possibile avvalersi di modelli di circolazione marina avanzati, capaci di determinare una previsione delle correnti ageostrofiche.

La rappresentazione della macchia di olio in MEDSLIK.II viene fatta attraverso un numero N di particelle. Queste vengono trasportate e disperse dal campo di corrente, dal vento e dalle onde (De Dominicis et al., 2014). L'avvezione consiste nel trasporto del campo scalare, in questo caso rappresentato dalla macchia d'olio dovuto ai movimenti macroscopici del fluido, mentre la diffusione è dovuta ai

movimenti microscopici. Il trasporto della macchia è governato, infatti, dalle correnti marine e dall'azione del vento alla superficie del mare. Le particelle vengono disperse dalle componenti delle fluttuazioni turbolente, che sono parametrizzate con uno schema *random-walk*. Simulare il comportamento dell'idrocarburo disperso in mare significa determinare la variazione della sua concentrazione (C) nel tempo e nello spazio. Il modello risolve l'equazione generale per la concentrazione dell'inquinante $C(x,y,z,t)$:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{U}\nabla C = \nabla(\vec{K}\nabla C) - \sum_{j=1}^M r_j(C)$$

dove $\frac{\partial}{\partial t}$ è il tasso locale di variazione della concentrazione dell'inquinante nel tempo; \vec{U} è il campo medio della corrente marina con componenti (u,v,w) ; \vec{K} è il tensore di diffusività che parametrizza gli effetti turbolenti; $r_j(c)$ sono gli M tassi di trasformazione che modificano la concentrazione dell'inquinante a causa di reazioni chimiche e mescolamento meccanico (De Dominicis et al., 2013). Questo consente di ottenere numericamente una stima del trasporto e della dispersione delle particelle di idrocarburi, oltre ad ottenere una stima quantitativa dei principali processi chimico-fisici coinvolti durante l'evoluzione dell'evento (percentuale di olio sulla superficie del mare, disperso nella colonna d'acqua, evaporato e percentuale di olio depositato sulla costa) al fine di fornire una risposta sulla metodologia di intervento in tempo quasi-reale nel caso di un'eventuale dispersione nell'area di studio.

Le condizioni al contorno sono rappresentate dai campi bidimensionali di direzione e intensità del vento e dai campi tridimensionali oceanografici, quali direzione e intensità della corrente marina e temperatura superficiale del mare. La qualità delle condizioni al contorno è fondamentale, in quanto esse influenzano fortemente il risultato numerico del trasporto e della dispersione delle particelle.

L'iniziale volume di inquinante considerato nella simulazione numerica è suddiviso in N particelle. Ciascuna è caratterizzata da un vettore posizione:

$$x_k(t) = (x_k(t), y_k(t), z_k(t)), k = 1, N$$

e da un volume $v(n_k, t)$ dove n_k è il numero che identifica la particella. Inoltre, ciascuna delle N particelle è identificata da un indice di stato che consente di

stabilire se la particella è in superficie o lungo la colonna d'acqua. I processi di avvezione e diffusione sono quindi risolti usando le N particelle lagrangiane. Le equazioni prognostiche per il loro spostamento sono le seguenti:

per $\sigma = 0$

$$dx_k(t) = [\mathbf{U}_C(x_k, y_k, 0, t) + \mathbf{U}_W(x_k, y_k, t) + \mathbf{U}_S(x_k, y_k, t)]dt + \sqrt{2\mathbf{K}dzZ}$$

per $\sigma = 1$

$$dx_k(t) = [\mathbf{U}_C(x_k, y_k, z_k, t)]dt + \sqrt{2\mathbf{K}dzZ}$$

dove σ è l'indice di stato delle particelle e descrive, rispettivamente, se la particella è in superficie o dispersa nella colonna d'acqua, \mathbf{U}_C è il termine di velocità della corrente marina, \mathbf{U}_W è il termine di correzione indotto dalla velocità del vento locale, \mathbf{U}_S è il termine di corrente indotta dal moto ondoso (velocità di Stoke drift) e \vec{K} è il tensore diagonale della diffusione turbolenta. Il vettore \vec{Z} rappresenta numeri random indipendenti e viene usato per la parametrizzazione della diffusione turbolenta (*random walk*).

5 Uso della Graphical User Interface - GUI

Per accedere alla *GUI* è necessario collegarsi al seguente indirizzo:

<http://150.145.38.60:8080/sos/public/login.xhtml>.

Il sito reindirizza l'utente all'interfaccia di login sulla quale autenticarsi mediante le credenziali di accesso (Figura 3) che possono essere richieste al gestore informatico (si veda la sezione CONTATTI) e saranno sotto forma di nome utente e password (al primo accesso il sistema richiede la modifica della password temporanea fornita). Ad avvenuto riconoscimento, si verrà reindirizzati alla Home Page di sistema sulla quale sono fornite alcune informazioni sul progetto SOS-Piattaforme. Dal punto di vista operativo, è possibile iniziare ad utilizzare la

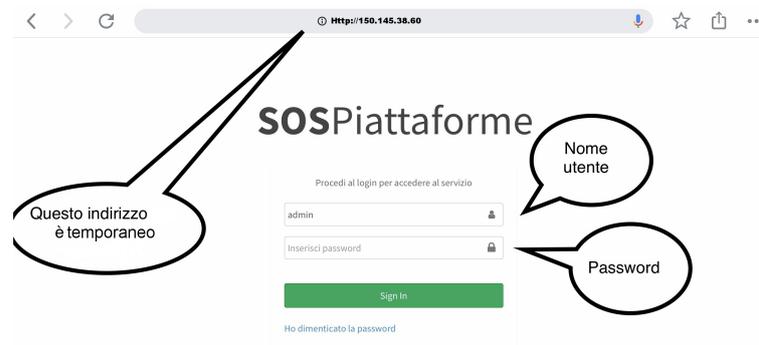


Fig. 3: Schermata di accesso all'applicazione SOS-Piattaforme per la produzione di scenari di previsione della dispersione, trasporto e trasformazione di una macchia di idrocarburo rilasciato alla superficie del mare in corrispondenza delle piattaforme estrattive ad olio localizzate nei mari italiani.

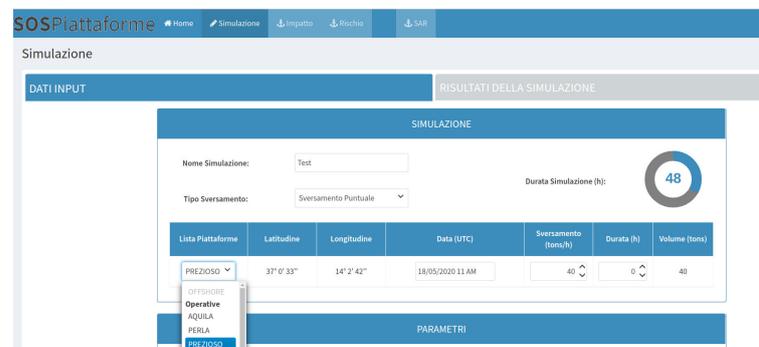


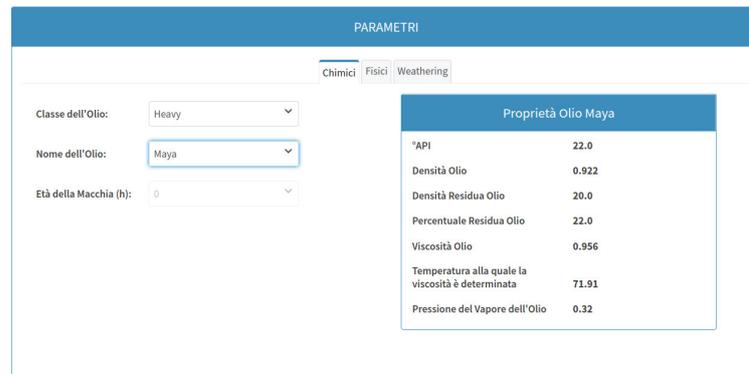
Fig. 4: Scheda Dati di Input per la definizione della lunghezza (in ore) della previsione numerica che si vuole realizzare, la selezione della posizione della piattaforma estrattiva e quantità di idrocarburo rilasciato alla superficie del mare.

GUI selezionando, dal menu della barra superiore, la sotto-scheda *Simulazione* (Figura ??) e procedere alla fase di inserimento dei dati di input (Figura 4).

La scheda *SIMULAZIONE* permette di definire i parametri di ingresso (dati di input) tra cui: il nome della simulazione utilizzato per la memorizzazione dei risultati nell'archivio del server di calcolo e facilitare l'utente nelle fasi di ricerca dello storico simulazioni da lui effettuate, la lunghezza della previsione numerica, cioè la durata (in ore) dello scenario di dispersione richiesto (multipli di 24 ore fino ad un massimo di 96 ore), il tipo di sversamento da selezionare su un menu a tendina scegliendo fra sversamento puntuale o areale. La GUI è stata progettata in modo che il modello di dispersione degli idrocarburi contempli sversamenti puntuali in corrispondenza delle piattaforme estrattive di idrocarburi nel Canale di Sicilia e nel Mare Adriatico, selezionabili attraverso l'apertura del menu *Lista*

Piattaforme, e la dispersione puntuale o areale in mare aperto. La scelta di una delle piattaforme indicate nella lista definisce, in modo automatico, le sue coordinate in gradi, primi e secondi (schede *Latitudine e Longitudine*). Qualora le piattaforme siano costituite da un campo, cioè un insieme di diverse piattaforme tra loro vicine come nel caso del campo Rospo e Sarago, le coordinate indicate rappresentano il punto medio dell'ipotetico sversamento. Oltre alle coordinate geografiche la GUI necessita anche dell'inserimento dell'istante temporale in cui si presume sia avvenuto lo sversamento oppure dell'osservazione (scheda *Data [UTC]*), la portata dello sversamento (*Sversamento [ton per ora]*) ipotizzato costante nel tempo e la sua durata (*Durata [ore]*). La stima di queste quantità possono essere inserite scorrendo il contatore oppure andando a inserire direttamente le cifre nel campo corrispondente. L'inserimento di questi dati definirà la quantità totale sversata (scheda *Volume [tons]*). Nel caso si voglia inserire uno sversamento istantaneo (il parametro di input *Durata* deve essere lasciato impostato a zero), il volume rilasciato coincide con la portata. Pertanto, nella corrispondente simulazione numerica, tutta la quantità indicata nel campo *Sversamento* verrà virtualmente rilasciato all'istante iniziale, definito nel campo *Data*. Viceversa nel caso di sversamento continuo, il parametro *Durata* deve assumere un valore diverso zero, e la quantità indicata nel campo *Sversamento* sarà rilasciata in maniera costante durante l'intero arco temporale.

Per completare l'inserimento dei dati di input è necessario definire nella scheda PARAMETRI alcune caratteristiche chimico-fisiche di parametri che governano i relativi processi. Questo è ottenuto inserendo alcune informazioni nelle sottoschede *Chimici*, *Fisici*, *Weathering*, indicate in Figura 5. I parametri Chimici riguardano esclusivamente la definizione della tipologia di idrocarburo sversato, identificabile attraverso la classe del °API (*Classe dell'olio*) e tipologia dell'olio (*Nome olio*) appartenente a quella classe. Nel riquadro a destra della precedente figura vengono sintetizzate le principali caratteristiche dell'olio identificato, tra cui il suo °API, la densità dell'olio sversato e di quello residuo, la percentuale del residuo, la viscosità, la temperatura alla quale la viscosità è stata determinata e la pressione del vapore dell'olio. Questi parametri andranno a contribuire alla parametrizzazione dei processi di dispersione e di weathering, come discusso nel paragrafo 2



Proprietà Olio Maya	
API	22.0
Densità Olio	0.922
Densità Residua Olio	20.0
Percentuale Residua Olio	22.0
Viscosità Olio	0.956
Temperatura alla quale la viscosità è determinata	71.91
Pressione del Vapore dell'Olio	0.32

Fig. 5: Schermata della scheda Dati di Input, Parametri chimici per la definizione della lunghezza (in ore) della previsione numerica, la selezione della posizione della piattaforma estrattiva e quantità di idrocarburo rilasciato alla superficie del mare.

La sotto-scheda *Fisici*, rappresentata nella figura successiva, consente, invece, di definire una serie di parametri che andranno ad impattare sui processi di dispersione e trasporto (*spreading* e *dispersion*) della macchia di idrocarburo da parte del campo di avvezione.



Fig. 6: Schermata della scheda Dati di Input, Parametri Fisici per la definizione del contributo alla dispersione della macchia dato dalle onde e dal vento. Sono visibili le impostazioni di default.

Il campo *Stokes drift* consente all'utente di includere, oppure escludere, nel calcolo della dispersione e trasporto della macchina di idrocarburo, il contributo della corrente di deriva indotto dalla presenza del moto ondoso. Per semplicità, la GUI è stata progettata in modo da includere sempre il calcolo delle correnti di deriva utilizzando il metodo di *Jonswap*, il quale determina una stima del campo in funzione dell'intensità del vento, direzione e fetch. Viceversa se si volessero utilizzare i dati di previsione di un modello d'onda (attualmente non disponibile), oppure escludere il contributo della corrente di deriva, sarebbe necessario modificare opportunamente la scheda scegliendo l'opzione adeguata. Un altro

parametro che è possibile modificare è il campo *Wind correction*, rappresentato dai sotto-campi *Drift factor* and *Drift Angle*, che permette di correggere il contributo del vento alla dinamica superficiale del mare. Valori tipici sono $\alpha=0.03$ (3% dell'intensità del vento) e $\beta=30$ (30° rispetto alla direzione del vento). Nel paragrafo successivo verranno mostrati alcuni risultati dell'impatto dell'applicazione della *Wind correction* sulla dispersione superficiale. L'ultimo parametro fisico che è possibile modificare è rappresentato dalla profondità del termocline (*Depth of the thermocline*), cioè la profondità entro la quale esiste la massima variazione verticale della temperatura. E' noto che questa è principalmente in funzione della stagione (più vicina alla superficie in estate, più in profondità in inverno) e, in alcuni casi, anche delle condizioni dinamiche locali dell'area di interesse.

L'ultima scheda è rappresentata dal campo *Weathering*, con le sotto-schede *Evaporazione*, *Emulsificazione* e *Dispersione*, rappresentata in Figura 7.

In questa sotto-scheda è possibile modificare diversi parametri che hanno un impatto esclusivamente sui processi di weathering. Ogni campo presente nelle sotto-schede Fisici e Weathering è dotato di un valore di default che l'utente può modificare. La modifica dei valori pre-impostati richiede una conoscenza approfondita da parte dell'utente dei processi parametrizzati dal modello di dispersione. L'interfaccia memorizza le modifiche effettuate evidenziando in arancione i parametri delle relative sotto-schede ed inserendo un alert "Parametri simulazione modificati" (Figura 8).

Terminata la fase di inserimento dei dati di input, o di modifica dei dati preimpostati, la scheda RIEPILOGO SIMULAZIONE sintetizza le principali informazioni che caratterizzeranno la simulazione che si andrà ad effettuare (Figura 9). La simulazione numerica può essere avviata andando a cliccare sul tasto AVVIA SIMULAZIONE. Il sistema controlla in automatico la presenza di tutti i parametri necessari ad avviare la simulazione ed in caso di assenza invia un feedback all'utente per la correzione della problematica riscontrata.

Dopo la conferma dell'avvio della simulazione numerica, la GUI indirizza l'utente alla scheda RISULTATI DELLA SIMULAZIONE (Figura 10). In questa scheda sono rappresentati in ordine cronologico tutte le simulazioni numeriche effettuate dall'utente. In particolare: sono indicati i *Tempi di Simulazione*, cioè la data e l'ora in cui è stata richiesta la simulazione numerica, le *Informazioni sulla si-*

PARAMETRI

Chimici Fisici **Weathering**

Evaporazione Emulsificazione Dispersione

Exponent of wind speed in evaporation rate: 0.78 Default: 0.78

PARAMETRI

Chimici Fisici **Weathering**

Evaporazione **Emulsificazione** Dispersione

Reciprocal of maximum water fraction: 1.3333 Default: 1.3333

Maximum water fraction does increase with API: Default: ON

PARAMETRI

Chimici Fisici **Weathering**

Evaporazione Emulsificazione **Dispersione**

Downward diffusion velocity of small droplets (m/s): 0.001 Default: 0.001

Rising velocity of large droplets (m/s): 0.08 Default: 0.08

Rising velocity of small droplets (m/s): 0.0003 Default: 0.0003

Depth of well-mixed surface layer (m): 0.5 Default: 0.5

Interfacial tension between oil and water: 24.0 Default: 24.0

Maximum fraction of oil that can be dispersed: 1.0 Default: 1.0

Fig. 7: Sottoschede Weathering. In alto i parametri corrispondenti al processo di Evaporazione, al centro quelli dell'Emulsificazione ed in basso quelli per la Dispersione.

PARAMETRI

Parametri simulazioni modificati.

Chimici **Fisici** Weathering

Stokes Drift: Calcolato con Jonswap Default: Jonswap

Wind correction (Drift Factor): 0.00 Default: 0.0

Wind correction (Drift Angle): 0.1 Default: 0.0

Depth of the thermocline: 30.0 Default: 30.0

Fig. 8: Scheda di esempio di alert di parametri modificati.

RIEPILOGO SIMULAZIONE	
Nome Simulazione:	Test
Durata Simulazione (h):	48
Previsioni correnti marine:	***SCRM***
Previsioni meteo:	Skiron
Previsioni onde:	None
*API:	22.0
Stokes drift:	Calcolato con Jonswap
Wind correction:	No
Depth of thermocline:	30.0

Avvia Simulazione

Fig. 9: Nella scheda a sinistra viene riportato il riepilogo dei dati inseriti ed indicati i modelli che hanno prodotto i campi di vento, corrente ed onde (se presente). A destra è indicata la posizione della piattaforma da cui avverrà l'ipotetico sversamento

mulazione, che includono il nome della simulazione (che è stato definito durante la fase di input) e il suo stato. Questa può essere ATTIVA quando la simulazione numerica è in esecuzione, IN ATTESA quando sono stati avviati più processi contemporaneamente oppure TERMINATA quando la simulazione numerica si è conclusa correttamente. Una *progressive bar* indica in termini percentuali la progressione di calcolo necessario per la visualizzazione del risultato della simulazione. Per una simulazione di 72 ore, il tempo di attesa è di circa 20' di calcolo. Se vengono avviate in sequenza più simulazioni numeriche, anche da diversi utenti contemporaneamente, queste sono effettuate secondo l'ordine cronologico di inserimento. L'ultima informazione della Scheda RISULTATI DELLA SIMULAZIONE è rappresentata dal nome della piattaforma petrolifera in cui abbiamo ipotizzato lo sversamento.

Nella scheda PARAMETRI DI SIMULAZIONE vengono sinteticamente indicati il tipo di sversamento (puntuale o areale), il nome dell'olio, le coordinate geografiche (latitudine e longitudine), la data iniziale dello sversamento, la portata e il volume. Nell'ultima colonna, invece, sono indicate le azioni che l'utente può effettuare.

Durante l'esecuzione numerica l'utente può interrompere la simulazione e nessun risultato sarà visibile. Al termine del completamento della simulazione, l'utente può visualizzare il file di testo in cui sono indicati tutti i parametri usati, elimina-

DATI INPUT				RISULTATI DELLA SIMULAZIONE							
Tempi Simulazione	Informazioni Simulazione			Parametri Simulazione							
Inserimento	Nome	Stato	Filtra	Tipo	Nome dell'Olio	Latitudine	Longitudine	Data (UTC)	Spill rate Spill duration Volume	Azioni	
15/05/2020 10:53:47	Test	ATTIVA 31%	Tutto	PREZIOSO	Punto	Duri	37° 0' 33"	14° 2' 42"	05/05/2020 05:00:00	40 (tonc/h) 0 (h) 0 (tonc)	

Fig. 10: Schermata della scheda "Risultati della Simulazione" nella quale sono visibili, in corrispondenza di diverse simulazione avviate, i relativi messaggi di Stato (Simulazione Terminata, Attiva oppure In Coda).

re la simulazione appena conclusa oppure visualizzare i risultati, come mostrato in Figura 11.

DATI INPUT				RISULTATI DELLA SIMULAZIONE							
Tempi Simulazione	Informazioni Simulazione			Parametri Simulazione							
Inserimento	Nome	Stato	Filtra	Tipo	Nome dell'Olio	Latitudine	Longitudine	Data (UTC)	Spill rate Spill duration Volume	Azioni	
15/05/2020 10:53:47	Test	TERMINATA	Tutto	PREZIOSO	Punto	Duri	37° 0' 33"	14° 2' 42"	05/05/2020 05:00:00	40 (tonc/h) 0 (h) 0 (tonc)	

Fig. 11: Rappresentazione della scheda quando la simulazione è terminata

Per la visualizzazione dei risultati, la GUI provvederà all'apertura di una nuova pagina dove verrà rappresentata graficamente l'evoluzione temporale dei principali processi di trasformazione degli idrocarburi, in particolare della frazione percentuale di olio evaporato, quella residua sulla superficie del mare, sulla costa e nella colonna d'acqua (Figura 12). Una discussione dettagliata del significato di queste informazioni e del loro utilizzo operativo sarà effettuata nel prossimo paragrafo, dove verranno analizzati i risultati di alcuni esempi.

Oltre all'evoluzione temporale dei principali parametri di weathering, la GUI consente di visualizzare l'evoluzione nello spazio e nel tempo della concentrazione di inquinante mediante un'animazione. Questa può essere attivata cliccando nel centro dell'immagine oppure sul tasto START (vedi Figura 13 in alto a sinistra). Agendo sul puntatore del cursore è possibile visualizzare l'animazione dall'istante temporale di interesse sino alla fine della simulazione numerica. Ogni immagine dell'animazione rappresenta la previsione numerica della distribuzione spaziale (media oraria) della concentrazione dell'inquinante alla superficie del mare, a partire dalla data di rilascio. Il campo di previsione della corrente marina stimata dal sistema di previsione della circolazione è graficamente rappresentato dalle

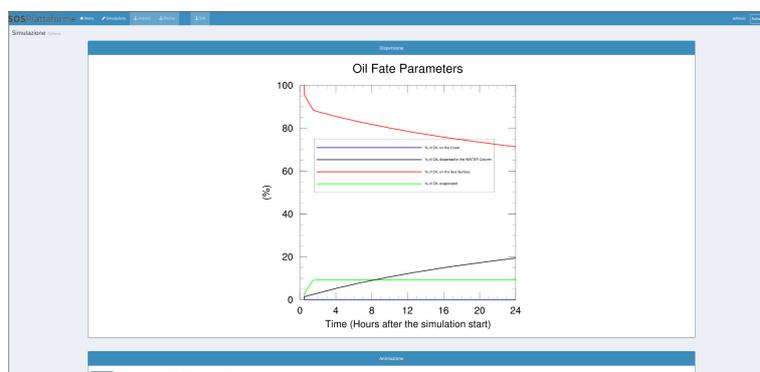


Fig. 12: Evoluzione temporale dei diversi processi di weathering. La curva verde rappresenta la percentuale di evaporazione, quella rossa la percentuale del residuo alla superficie del mare, quella blu la percentuale di beaching ed infine quella nera la percentuale dispersa nella colonna d'acqua.

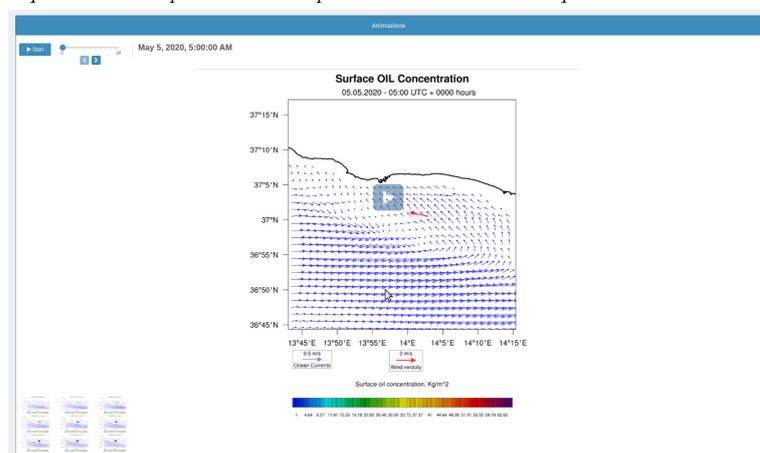


Fig. 13: Scheda per la visualizzazione dei risultati attraverso l'animazione grafica della dispersione della macchia oppure la visualizzazione temporale di singole immagini. Il numero di immagini prodotte dalla GUI è pari al numero di ore della simulazione numerica effettuata.

frece azzurre, mentre il campo di previsione del vento è rappresentato dalla freccia rossa in corrispondenza del baricentro della macchia. Per visualizzare ed ampliare una singola immagine di interesse è necessario cliccare (doppio click) sulla corrispondente immagine in basso a sinistra della Figura 13.

6 Risultati

Il sistema di previsione della dispersione di idrocarburi in mare è stato progettato e realizzato in modo tale da poter permettere agli enti preposti (Comando Generale della Guardia Costiera) di realizzare scenari di simulazione numerica

di dispersione di idrocarburi in mare in maniera autonoma. Nelle sezioni che seguono sono mostrati i risultati dell'applicazione della GUI per ipotetici *Oil Spills* rilasciati in corrispondenza delle piattaforme estrattive ad olio (Sezione 6.1) oppure in condizioni di mare aperto (Sezione 6.2).

In particolare, vengono mostrati ed analizzati i risultati di più esperimenti numerici al fine di evidenziare l'impatto del °API e delle condizioni meteo-marine sui processi di dispersione e trasformazione. A titolo esemplificativo è stata scelta la piattaforma estrattiva Prezioso (Golfo di Gela), come ipotetico punto di rilascio puntuale alla superficie del mare (Sezione 6.1), a cui seguiranno altri esperimenti eseguiti in mare aperto (Sezione 6.2).

6.1 Oil Spill da Piattaforma estrattiva

In questo paragrafo sono mostrati alcuni scenari di simulazione di ipotetici *oil spills* in funzione di alcuni parametri di ingresso (rilascio istantaneo, continuo nel tempo, °API e *Wind drift correction*) al fine di evidenziare il loro impatto sull'analisi della distribuzione e trasformazione degli idrocarburi. A titolo esemplificativo è stata scelta la piattaforma estrattiva Prezioso (Golfo di Gela) come ipotetico punto di rilascio (puntuale) alla superficie del mare.

6.1.1 Scenario da Oil Spill istantaneo

In questo esperimento numerico la GUI viene usata per simulare un'ipotetica dispersione di $240 m^3$ di olio (*Ragusa*), rilasciato in maniera istantanea alle ore 04:38 UTC del 05/05/2020 alla superficie del mare in corrispondenza della piattaforma estrattiva Prezioso. Questa tipologia di idrocarburo appartiene alla classe degli oli pesanti (°API=19.8). La lunghezza della simulazione numerica è stata impostata a 72 ore. Tutti i parametri fisici, chimici e di weathering, descritti nella scheda di Figura 7 non sono stati modificati, pertanto assumono i valori di riferimento. Dopo aver attivato il modulo di previsione dello sversamento fisicamente sul server di calcolo dell'IAS-CNR di Oristano ed atteso il tempo necessario per eseguire il calcolo numerico, la GUI mostra l'evoluzione dei parametri evolutivi della macchia *Oil Fate Parameter*, rappresentati in Figura 14. I risultati mettono in evidenza un incremento (da 0% al 15%) del tasso di evaporazione media in circa 5 ore dall'inizio dello sversamento, a causa della perdita

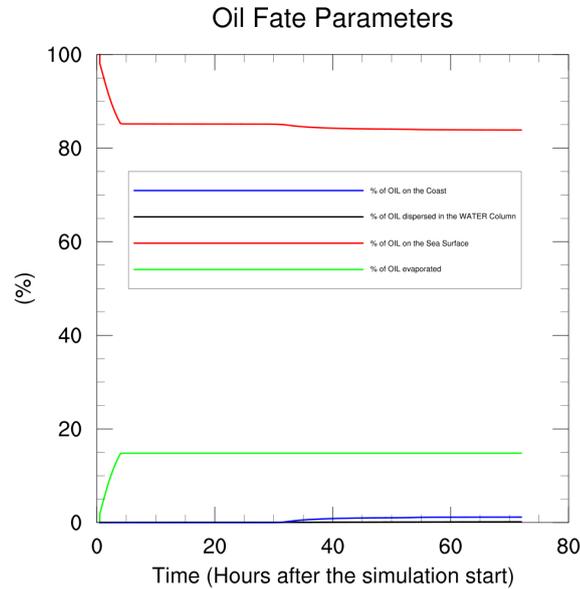


Fig. 14: *Evoluzione temporale dell'evaporazione, frazione dispersa in mare, in colonna d'acqua e sulla costa.*

da parte dell'olio della sua componente VOLATILE. Questo processo, di fatto, riduce la frazione percentuale presente sulla superficie del mare sino a circa l'85% del volume iniziale, da recuperare con i mezzi anti-inquinamento. La frazione di olio sulla superficie del mare rimane tendenzialmente costante nel tempo, sino alla fine della simulazione numerica, sebbene il modello mostri, dopo circa 30 ore dallo sversamento, una piccola frazione di olio che si deposita sulla costa (<1%). L'impatto è mostrato in Figura 15 dove sono rappresentati l'evoluzione spaziale e temporale della dispersione e il trasporto della concentrazione della macchia di olio. La macchia, inizialmente rilasciata in maniera istantanea alla superficie del mare, viene dispersa dalle correnti verso ovest, raggiungendo la costa. Successivamente, per effetto della presenza di un vortice ciclonico localizzato approssimativamente sulla scarpata del Golfo di Gela, la macchia tende ad essere dispersa verso sud-est per effetto delle correnti di mare aperto che si dirigono verso il Mare Ionio.

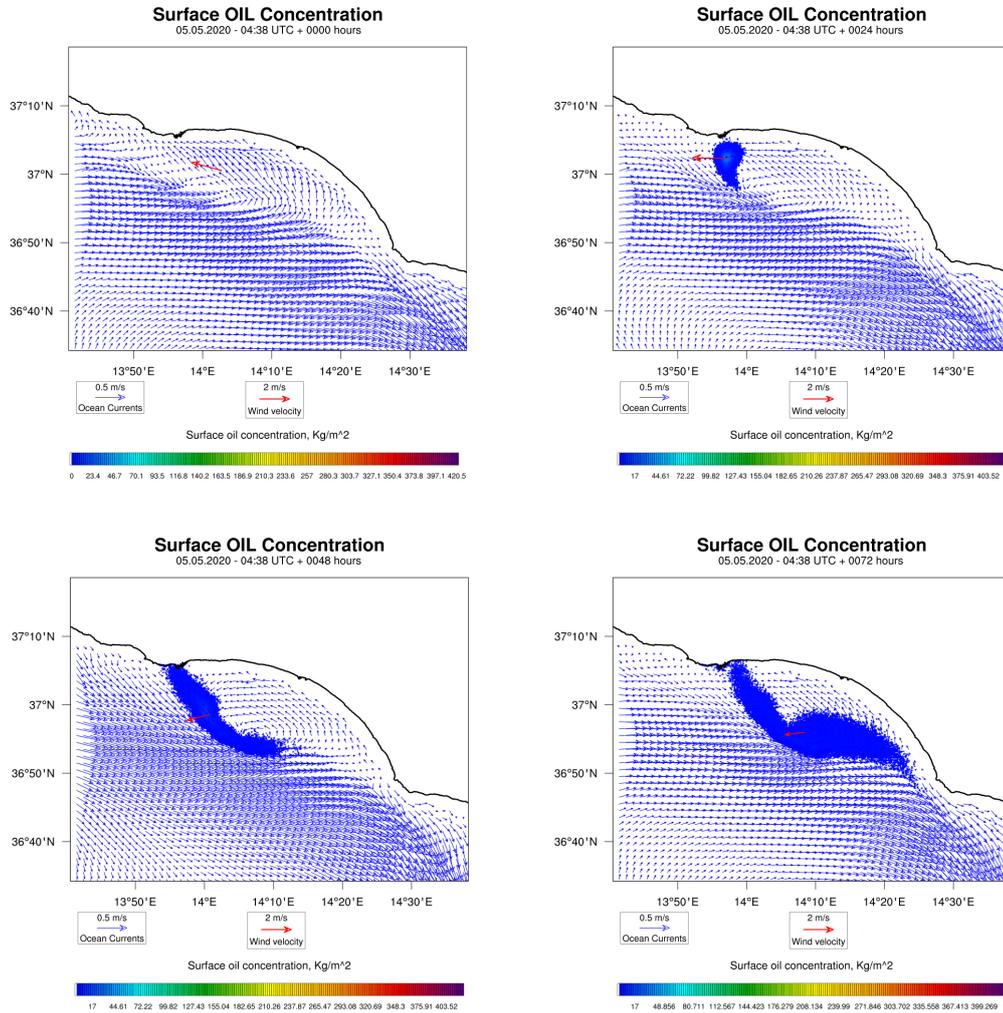


Fig. 15: Distribuzione spaziale e temporale della concentrazione dell'Oil SPill, del campo di corrente e del vento medio mostrato dopo 0, 24, 48 e 72 ore rispetto all'istante di sversamento ipotizzato il 5 Maggio 2020 alle ore 04:38 UTC in corrispondenza della piattaforma estrattiva Prezioso.

6.1.2 Scenario da Oil Spill istantaneo e impatto del Wind Drift correction

A causa delle approssimazioni effettuate nel modello matematico e, di conseguenza, in quello numerico, della parametrizzazione dei numerosi processi chimico-fisici, e tenuto conto della non precisa conoscenza dei diversi parametri di input, come la quantità di olio sversato in mare, l'istante temporale, il suo grado API, ecc., non sempre le decisioni prese sulla base di un unico *scenario* di simulazione numerica sono efficaci. Questo è valido soprattutto nei casi in cui la soluzione

del modello mette in evidenza un possibile rischio per l'ambiente marino. In tal caso è necessario eseguire ulteriori esperimenti numerici al fine di valutare, con maggiore consapevolezza, le eventuali strategie da intraprendere. Viste le numerose variabili in gioco è possibile creare una moltitudine di esperimenti. Una possibilità di forte impatto sulla soluzione numerica del modello, per esempio, è quella di modificare i parametri fisici illustrati nella Figura 6, incrementando così l'effetto del vento sulla superficie del mare. Questo porta ad un'intensificazione dell'effetto di trascinamento del vento sulla superficie della macchia di idrocarburo. Pertanto, attraverso la GUI, è stato effettuato un nuovo esperimento numerico in cui sono stati modificati, rispetto a quello precedente, i seguenti parametri fisici ($\alpha=0.03$ e $\beta=30$) ed il risultato in termini di *Oil Fate Parameters* è mostrato in Figura 16. Mettendo a confronto la risposta del modello, cioè i ri-

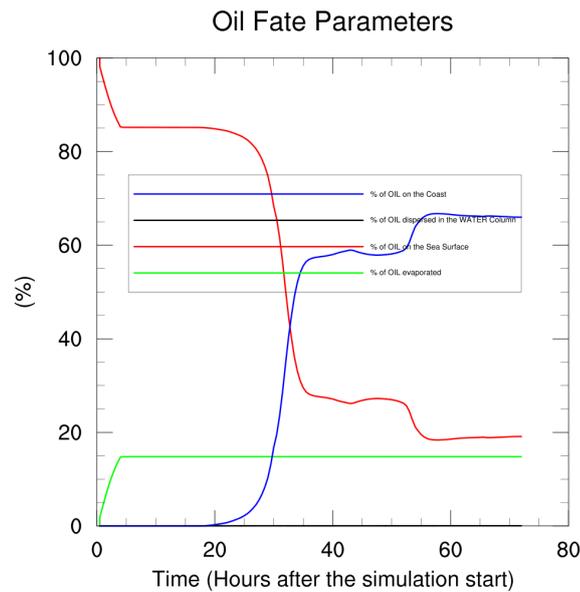


Fig. 16: Evoluzione temporale dell'evaporazione, frazione dispersa in mare, in colonna d'acqua e sulla costa ottenuto incrementando l'effetto del vento alla superficie del mare.

sultati qui ottenuti, con quelli dell'esperimento precedente (Figura 14) si osserva immediatamente una risposta molto differente, soprattutto in termini di impatto dell'olio sulla costa. Infatti, in queste nuove condizioni, il modello simula un impatto dell'olio sulla costa dopo circa 20 ore dall'iniziale sversamento. Questa frazione cresce esponenzialmente nel tempo raggiungendo un massimo relativo pari a circa il 60% dell'olio sversato dopo circa 40 ore e mostra una tendenza ad

un'ulteriore crescita. La distribuzione spaziale della dispersione della macchia di olio è rappresentata in Figura 17, la quale evidenzia l'effetto combinato dell'azione del vento alla superficie e della corrente verso l'area costiera.

I risultati di questi due esperimenti mostrano, per le condizioni idrodinamiche

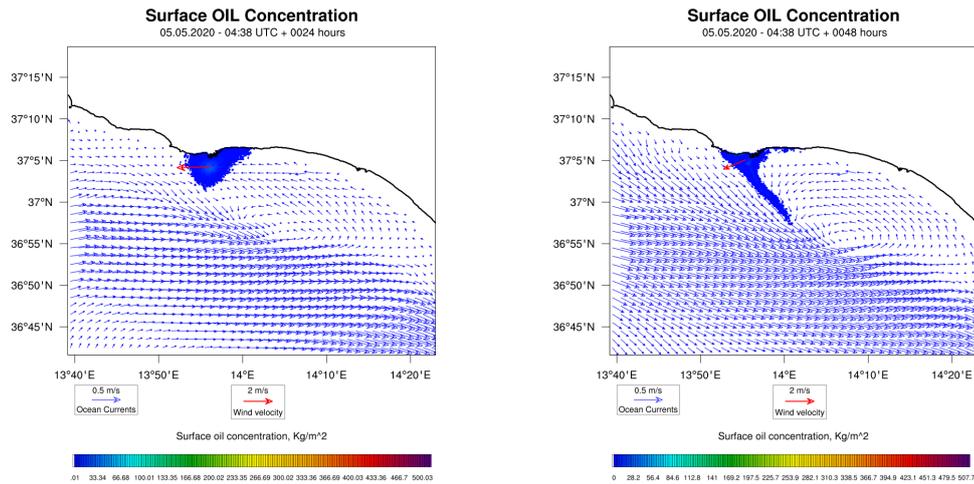


Fig. 17: Distribuzione spaziale della concentrazione dell'olio, del campo di corrente e del vento medio dopo 24 e 48 ore rispetto all'istante di sversamento ipotizzato il 5 maggio 2020 alle ore 04:38 UTC in corrispondenza della piattaforma estrattiva Prezioso.

previste per il 5 maggio 2020 e giorni seguenti, un probabile spiaggiamento della macchia di olio sulla costa entro le prime 20 ore. Questo valore, pertanto, rappresenta una stima dell'ampiezza della finestra temporale entro cui è possibile allertare e mettere in operatività tutti i mezzi anti-inquinamento a protezione della fascia costiera. Dopo l'eventuale spiaggiamento o *beaching* dell'olio, la frazione che rimane sulla superficie del mare è pari solo a circa il 20 % del volume totale (dopo 72 ore).

6.1.3 Scenario da Oil Spill continuo nel tempo

Gli esperimenti numerici precedenti sono stati eseguiti ipotizzando uno sversamento di 240 m^3 di olio *Ragusa* rilasciati alla superficie del mare in maniera istantanea, cioè all'istante iniziale della simulazione numerica ($t=t_0$). È evidente che questa approssimazione rappresenti una semplificazione del sistema che si

tenta di *modellizzare*, non conoscendo a priori la durata dello sversamento così' come molto spesso non si conoscono i reali volumi in gioco. Pertanto, modificando opportunamente i parametri di ingresso della scheda di simulazione numerica (si veda la Figura 4), è possibile eseguire una nuova simulazione numerica, partendo dai dati dell'esperimento precedente, ipotizzando a titolo esemplificativo che il volume iniziale venga rilasciato in maniera costante alla superficie del mare durante l'intervallo temporale $t=t_0+\Delta t$ (dove $\Delta t=24$ ore). La risposta del mo-

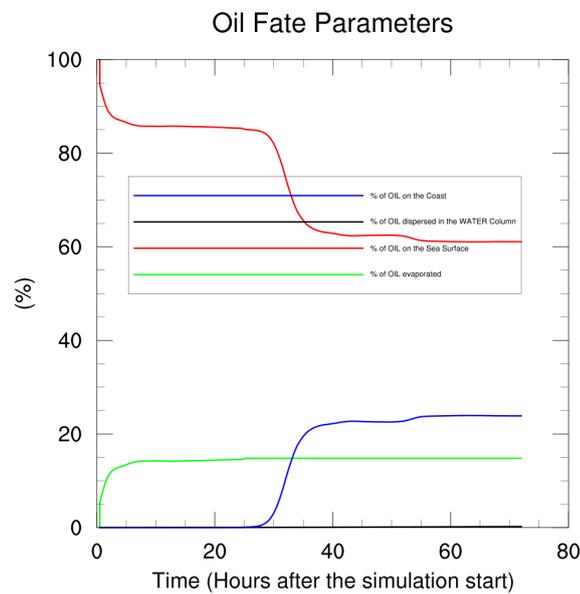


Fig. 18: Evoluzione temporale dell'evaporazione, frazione dispersa in mare, in colonna d'acqua e sulla costa ottenuto incrementando l'effetto del vento alla superficie del mare e distribuendo il volume sversato in 24 ore.

dello (Figura 18) evidenzia, ancora una volta, la possibilità di uno spiaggiamento della macchia. Rispetto all'esperimento precedente (Figura 16), però, osserviamo che l'impatto sulla costa avviene con circa 10 ore di ritardo (dopo 30 ore) e che la frazione percentuale di olio sulla costa si riduce approssimativamente al 20%. Il motivo è da attribuirsi al fatto che lo sversamento in corrispondenza della piattaforma è stato ipotizzato su un arco temporale $\Delta t=24$ ore, durante il quale il campo delle correnti superficiali e il vento cambiano di intensità e direzione modificando il trasporto e la concentrazione della macchia (Figura 19).

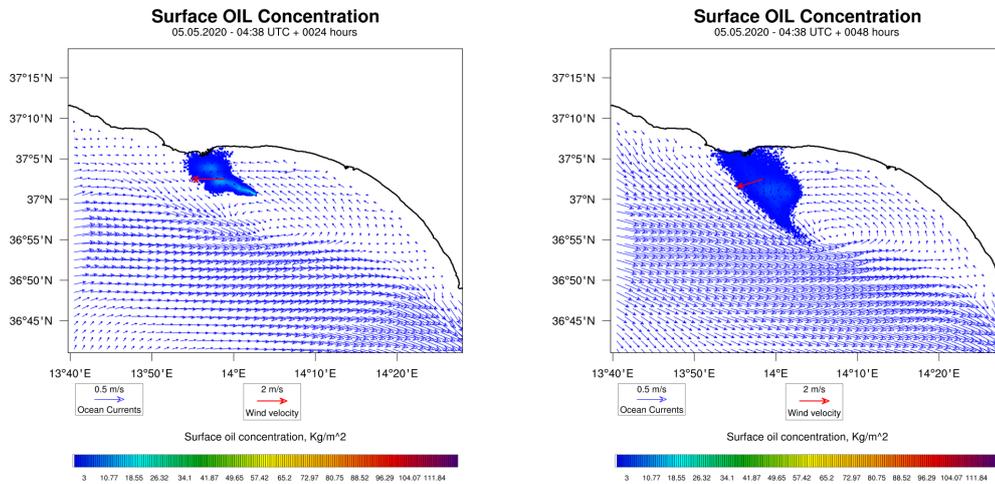


Fig. 19: Evoluzione temporale della dispersione dopo 24 ore (sinistra) e 48 ore (destra) rispetto all'istante iniziale ottenuta con l'applicazione del Wind drift correction alla superficie del mare.

6.1.4 Scenario da Oil Spill continuo e impatto del °API

Un'altra variabile che ha un notevole impatto sulla soluzione del modello numerico è rappresentato dal grado API dell'idrocarburo che, in alcune tipologie di sversamento, è molto difficile conoscere.

In questo paragrafo vengono presentati i risultati ottenuti modificando il grado API dell'olio sversato rispetto all'esperimento numerico precedente. Mediante la GUI si identifica la tipologia dell'olio (si veda Figura 5). Per i nostri scopi è stato selezionato l'*Arabian Heavy*, un olio appartenente alla classe media con un °API di 37.8, quindi un olio più leggero ($\rho=0.886 \text{ Kg/m}^3$) rispetto a quello precedente (*Ragusa*). Questo solitamente è il tipico olio trasportato dalle navi cisterna. L'analisi dell'evoluzione degli *Oil Fate Parameters* (Figura 20) evidenzia un'evoluzione del tasso di evaporazione notevolmente maggiore rispetto al precedente esperimento, che raggiunge il 35% dopo circa 10 ore. La soluzione numerica del modello evidenzia ancora lo spiaggiamento con una frazione del 15% dopo 40 ore rispetto all'istante iniziale. Di conseguenza, la frazione di olio che rimane alla superficie è circa il 45% del volume totale. Questa frazione, che rappresenta la quota che deve essere recuperata dai mezzi anti-inquinamento, risulta essere inferiore (di circa il 15%) rispetto a quello nell'esperimento precedente. Questo avviene perchè l'*Arabian Heavy*, avendo un grado API maggiore rispetto al *Ragu-*

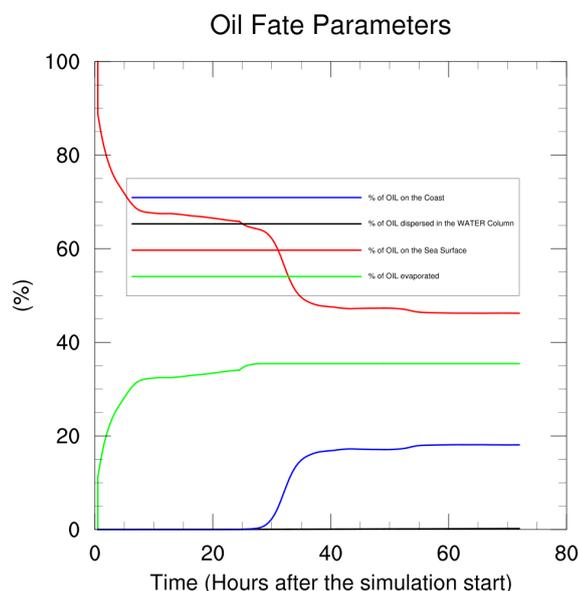


Fig. 20: Evoluzione temporale dell'evaporazione, frazione dispersa in mare, in colonna d'acqua e sulla costa di un oil spill con $\text{°API}=37.8$ ottenuta incrementando l'effetto del vento alla superficie del mare e distribuendo il volume sversato in 24 ore.

sa, presenta una componente volatile maggiore con conseguente riduzione della frazione di olio sulla superficie del mare e della sua concentrazione; la sua distribuzione spaziale resta pertanto quantitativamente invariata (non mostrato).

Al fine di valutare ulteriori contributi del grado API alla risposta del modello è stato eseguito un terzo esperimento scegliendo l'olio pesante Katina ($\text{°API}=10.7$) con una componente volatile molto bassa rispetto agli oli usati nei due esperimenti precedenti. I risultati (Figura 21) mostrano un'evaporazione massima del 10% del prodotto sversato pressoché immediata (entro le 4 ore), con conseguente raggiungimento della saturazione. Il *beaching* è di nuovo confermato nella misura del 20% dopo 30 ore dallo sversamento; la frazione che rimane alla superficie del mare, tuttavia, diminuisce nel tempo passando dall'80% dopo le prime 30 ore al 50% dopo 50 ore, evidenziando un'ulteriore tendenza alla diminuzione nelle ore successive. Questo comportamento è dovuto principalmente al fatto che tale olio si disperde nella colonna d'acqua per tutto il periodo della simulazione (curva nera della figura 21). La conseguenza di tale evento è che la concentrazione media che rimane alla superficie del mare risulta essere inferiore rispetto all'esperimento precedente (Figura 20).

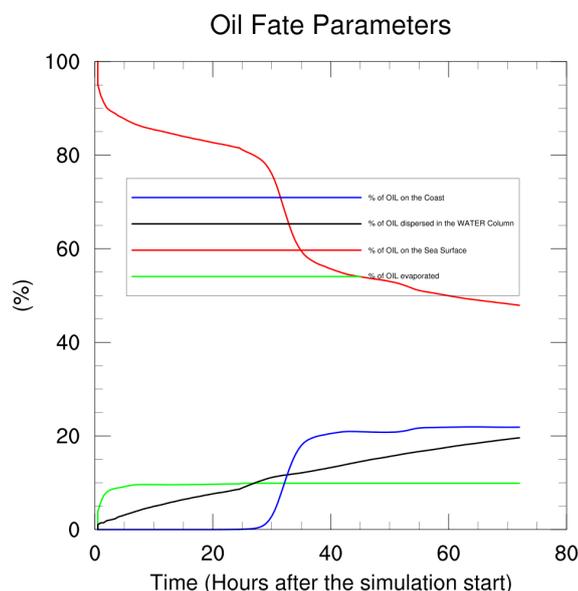


Fig. 21: Evoluzione temporale dell'evaporazione, frazione dispersa in mare, in colonna d'acqua e sulla costa di un Oil Spill con $\text{°API}=10.7$ e sversamento istantaneo.

6.2 Scenario da Oil Spill in mare aperto e impatto delle forzanti meteomarine

La funzionalità della GUI può essere estesa anche alla simulazione numerica di scenari in condizioni di mare aperto (offshore), in particolare per le aree del Mare di Sardegna, Mare Ligure, Mare Tirreno, Canale di Sardegna e Stretto di Sicilia. Per poter eseguire uno scenario di questo tipo è necessario impostare la tipologia di sversamento (si veda la Figura 4) che può essere di tipo puntuale, generalmente rappresentativa di una perdita da piattaforma estrattiva, oppure di tipo areale e identificabile da una macchia, nota in letteratura con il termine di *oil slick*. In generale, lo sversamento in mare aperto o OFFSHORE può essere collegato con buona probabilità ad una perdita di carburante da parte di un natante. Questa può avvenire occasionalmente a seguito di incidente, come la recente collisione avvenuta a nord di Capo Corso fra la portacontainer Cls Virginia e il traghetto Roro Ulysse della Ctn nel 2018, oppure frequentemente, come uno scarico illegale delle acque di sentina lungo la traiettoria percorsa dalle navi.

Selezionata la tipologia di sversamento (puntuale o areale) in ambiente OFFSHORE, la GUI richiede l'inserimento da parte dell'utente delle coordinate (latitudine

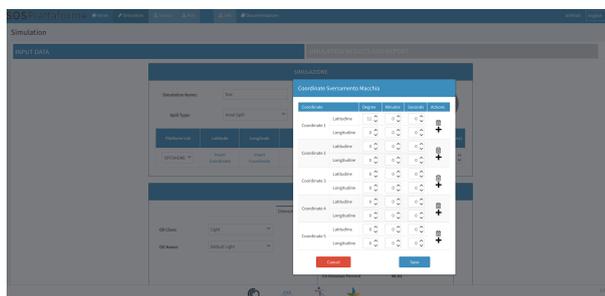


Fig. 22: Scheda di inserimento delle coordinate che delimitano i contorni di una macchia (ambiente OFFSHORE, rappresentazione di Oil Slick). E' possibile aumentare o ridurre il numero di punti agendo sul pulsante azione.

e longitudine in gradi, primi e secondi come illustrato in Figura 22), necessarie per definire il contorno della macchia se lo sversamento è areale, oppure una sola coppia di coordinate geografiche se lo sversamento è assimilabile ad un punto geografico. Una volta parametrizzata la geometria della macchia è necessario definire tutti i dati di input, quali la portata dello sversamento nel caso sia puntuale, o la stima della massa o del volume rilasciato nell'area nel caso di *oil spill*, la stima del °API, dei parametri fisici, chimici e di weathering. Si può quindi avviare la simulazione seguendo la procedura già illustrata nei paragrafi precedenti. L'evoluzione spaziale della distribuzione della concentrazione di un'ipotetica macchia osservata a sud est dell'Isola di Pantelleria (Stretto di Sicilia) è mostrata in Figura 23. Questa figura evidenzia la variabilità della concentrazione in funzione dei campi di previsione dei forzanti (corrente marina e vento) rilasciati dal sistema di previsione dello stato del mare per il 6 luglio 2020. In particolare, è evidente l'effetto dell'Isola, che provoca una riduzione dell'intensità del campo di correnti sotto-vento, e della corrente di Ekman. Questa corrente tende a muovere la macchia approssimativamente nella stessa direzione del vento, allontanando la macchia dall'Isola di Pantelleria. Nella Figura 24, invece, è mostrato lo stesso esperimento numerico utilizzando i campi di previsione rilasciati dopo 7 giorni (13 luglio 2020). Il confronto tra i risultati dei due esperimenti evidenzia l'effetto della variabilità del forzante meteo-marino sulla distribuzione della concentrazione. La diversa risposta del modello, conseguente alla differente variabilità della forzante meteo-marina, evidenzia l'importanza di avere a disposizione un sistema numerico di previsioni dell'idrodinamica marina capace di fornire in Tempo quasi-Reale o *Near Real Time* le informazioni necessarie a definire lo stato del

mare, che rappresentano le forzanti del modello di dispersione e trasformazione degli idrocarburi.

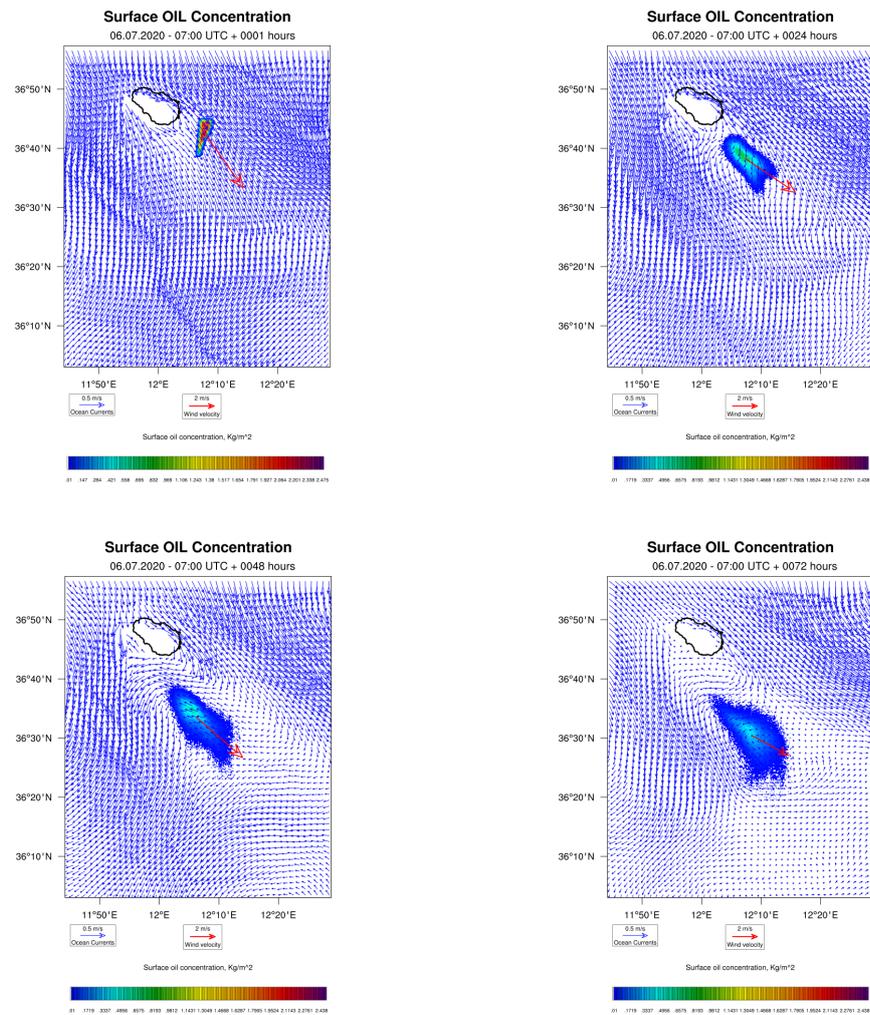


Fig. 23: Scenario di simulazione effettuato con i campi di previsione meteo-marini per il giorno 6 luglio 2020 di uno sversamento osservato (ore 07:00 UTC) in prossimità dell'Isola di Pantelleria all'istante iniziale e dopo 24, 48 e 72 ore di simulazione numerica.

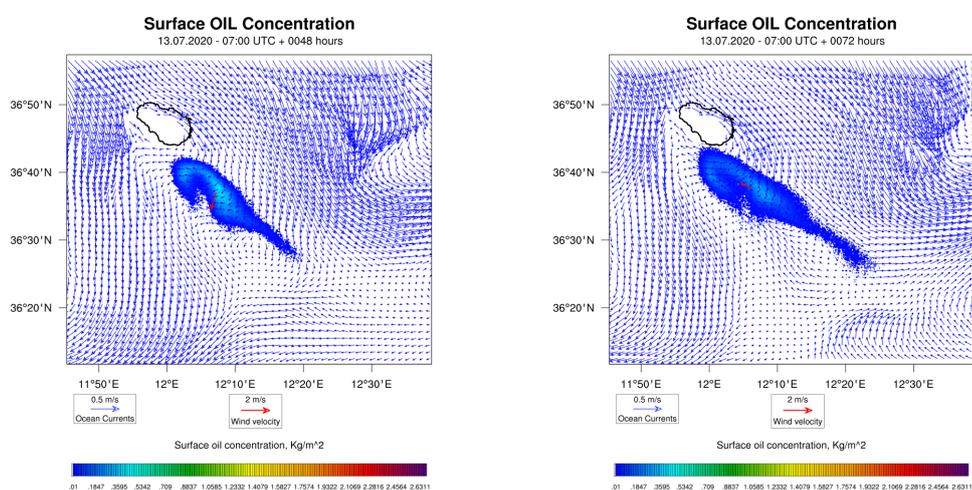


Fig. 24: Scenario di simulazione effettuato con i campi di previsione meteo-marini per il giorno 13 luglio 2020 di una macchia osservata (ore 07:00 UTC) in prossimità dell'Isola di Pantelleria e dopo 48 e 72 ore di simulazione numerica.

Contatti

Roberto Sorgente (resp. scientifico del progetto), skype contact: roberto.sorgente, email: roberto.sorgente@cnr.it

Andrea Pes (amministratore), skype contact: andrea.pes

Ente finanziatore

Convenzione SOS Piattaforme e Impatti Offshore (Servizio Di Previsione Numerica Della Dispersione Di Idrocarburi Dalle Piattaforme Petrolifere Del Canale Di Sicilia E Medio Basso Adriatico), finanziato dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (PNM.REGISTRO UFFICIALE.U 000939.17-01-2017 del 17.01.2017).

Ringraziamenti

Si ringraziano Fabio Antognarelli, Monica Pinna e Filippo Angotzi per il loro fondamentale supporto amministrativo nella gestione del progetto.

Si ringrazia Filippo Magri per la foto copertina (Vignola Mare, Aglientu, SS)

Riferimenti bibliografici

- De Dominicis, M., Falchetti, S., Trotta, F., Pinardi, N., Giacomelli, L., Napolitano, E., L. Faziol and, R. S., Haley, P. J., and Lermusiaux, P. (2014). A relocable ocean model in support of environmental emergencies. *Ocean Dyn.*, 64:667–688.
- De Dominicis, M., Pinardi, N., Zodiatis, G., and Lardner, R. (2013). A lagrangian marine surface oil spill model for the short-term forecasting-part i: Theory. *Geosci. Model Dev.*, 6:1851–1869.
- EEA, S. . (2015). Mediterranean sea region briefing - the european environment state and outlook 2015. Technical report, European Environment Agency.
- Farnesina (2017). The italian strategy in the mediterranean - stabilising the crises and building a positive agenda for the region. Technical report, Farnesina-Italian Ministry of Foreign Affairs and International Cooperation.
- Ferraro, G., Meyer-Roux, S., Muellenhoff, O., Pavliha, M., Svetak, J., Tarchi, D., and Topouzelis, K. (2009). Long term monitoring of oil spills in european seas. *International Journal of Remote Sensing*, 30(3):627–645.
- Garcia, D. A., D., B., F., C., and F., G. (2013). The oil spill hazard index (oshi) elaboration. an oil spill hazard assessment concerning italian hydrocarbons maritime traffic. *Ocean and Coastal Management*, 1:1–13.
- MISE (2020). Piattaforme marine. Technical report, Mise-Ministero dello Sviluppo Economic.
- Olson, D. M. and Dinerstein, E. (1998). The global 200: a representation approach to conserving the earth’s most biologically valuable ecoregions. *Conservation Biology*, 12(3):502–515.
- Pinardi, N. and Coppini, G. (2010). Operational oceanography in the Mediterranean Sea: the second stage of development. *Ocean Sci.*, 6:263–267.
- Ribotti, A., Bonomo, S., Alberico, I., Lirer, F., Cascella, A., Ferraro, L., and Sorgente, R. (2019). I-amica coastal hydrological surveys in the eastern tyrrhenian sea. *SEANOE*.

- Shami, A., G., H., I., A., D., B., D., A. G., and M., E.-F. (2017). Risk assessment of oil spills along the mediterranean coast: A sensitivity analysis of the choice of hazard quantification. *Science of the Total Environment*, 574:234–245.
- Sorgente, R., La Guardia, D., Ribotti, A., Arrigo, M., Signa, A., Pessini, F., Oliva, G., Pes, A., Perilli, A., and Di Maio, A. (2020). An operational supporting system for oil spill emergencies addressed to the the italian coast guard. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(12).
- Zodiatis, G., De Dominicis, M., Perivoliotis, L., Radhakrishnan, H., Georgoudis, E., Sotillo, M., Lardner, R. W., Krokos, G., Bruciaferr, D., Clementi, E., Guarnieri, A., Ribotti, A., Drago, A. F., Bourma, E., Padorno, E., Daniel, P., Gonzalez, G., Chazot, C., Gouriou, V., Kremer, X., Sofianos, S., Tintore, J., Garreau, P., Pinardi, N., Coppini, G., Lecci, R., Pisano, A., Sorgente, R., Fazioli, L., Soloviev, D., Stylianou, S., Nikolaidis, A., Panayidou, X., Karaolia, A., Gauci, A., Marcati, A., Caiazzo, L., and Mancini, M. (2016). The Mediterranean decision support system for marine safety dedicated to oil slicks predictions. *Deep Sea Res. Part II: Top. Stud. Oceanograr.* this issue.

