



Contratto di ricerca tra l'ing. Antonio Panebianco ed il
Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Ambientale (DICEA)
dell'Università degli Studi di Roma
“La Sapienza”.

**“Simulazione di oil-spill incidentale
dovuto alle attività di perforazione di un
pozzo esplorativo nel Canale di Sicilia”**

Pozzo Vesta

Relazione Finale

Dicembre 2013



SOMMARIO	
1	Introduzione 1
2	Studio di impatto ambientale in atmosfera..... 2
2.1	Analisi meteorologica 2
2.2	Simulazioni idrodinamiche 5
3	Simulazioni di oil spill 9
3.1	Descrizione degli scenari di oil spill 9
3.1.1	Il modello LASEMOD..... 10
3.2	Risultati delle simulazioni di Oil Spill 14
3.2.1	Scenario A1 15
3.2.2	Scenario A2 20
3.2.3	Scenario A3 26
3.2.4	Scenario B1 33
3.2.5	Scenario B2 39
3.2.6	Scenario B3 46
3.2.7	Scenario C1 53
3.2.8	Scenario C2 54
3.2.9	Scenario C3 54
4	Bibliografia 57



1 INTRODUZIONE

Il rilascio incidentale di idrocarburi da impianti di perforazione per pozzi marini può produrre un impatto ambientale rilevante, è necessaria quindi la simulazione preventiva dello scenario previsto e la pianificazione di eventuali misure di mitigazione.

Per valutare l'impatto degli idrocarburi si utilizza un sistema modellistico costituito da un modello idrodinamico ed un modello di dispersione. Con il primo si determinano le correnti marine e la turbolenza, mentre con il secondo si ricava la dinamica degli idrocarburi. Nel caso di rilasci a fondo pozzo, gli idrocarburi vengono trasportati attraverso tutta la colonna d'acqua, per effetto della spinta di galleggiamento. Quando invece il rilascio avviene direttamente sulla superficie del mare, gli idrocarburi occupano prevalentemente lo strato di acqua superficiale, ma per effetto del frangimento ondoso, una parte del film oleoso viene frammentato in goccioline minute, che tendono a diffondersi anche in questo caso sull'intera colonna d'acqua. È necessario quindi utilizzare un approccio tridimensionale del problema, considerando anche il movimento delle masse fluide lungo la direzione verticale.

Per lo studio degli eventi incidentali si sono considerati sia i casi con maggiore rischio ambientale, sia gli scenari relativi alle condizioni meteo più frequenti.

La relazione è stata suddivisa in due parti: nella prima si individuano le caratteristiche meteorologiche del sito e si determinano i campi idrodinamici per i vari scenari meteo ipotizzati. Nella seconda si considera l'impatto prodotto da perdite di gasolio accidentali durante le fasi di rifornimento dei serbatoi dell'impianto, considerando prima il rilascio di una parte del carico e poi il versamento della massa complessiva. L'ultimo caso considerato si riferisce alla perdita di greggio a fondo pozzo per una durata di 15 giorni.

In ciascun capitolo, alla descrizione dei modelli utilizzati e della loro configurazione segue l'analisi dei risultati numerici.



2 STUDIO DI IMPATTO AMBIENTALE IN ATMOSFERA

2.1 Analisi meteorologica

La caratterizzazione meteorologica dell'area in esame è stata effettuata impiegando i dati rilevati dal Servizio Informativo Agrometeorologico Siciliano. La stazione meteo più vicina al pozzo è quella di Pachino (SR), sita in prossimità di Capo Passero, località corrispondente all'estrema punta sud-orientale della Sicilia continentale. La serie storica utilizzata, relativa agli anni solari 2006-2012, contiene gli 61368 valori medi orari del modulo e della direzione della velocità del vento. La Figura 2.1 riporta la corrispondente rosa dei venti. Si osserva come i venti spirino con maggiore frequenza dalla direzione OSO (circa nel 20% degli eventi), mentre percentuali significative (circa il 10%) si riscontrano anche per i settori di provenienza NNE e O.

La Tabella 2.1 riporta la frequenza di occorrenza dei venti, suddivisa per classi di velocità e settore angolare. La classe di velocità più frequente (6.40%) corrisponde a quella compresa nell'intervallo 5-10 m/s relativa alla direzione OSO. Tale vento tende a trasportare l'olio presente in prossimità della superficie verso il mare aperto, lontano sia dalla costa siciliana sia da quella maltese. D'altro canto, i venti provenienti dal secondo quadrante, che favorirebbero il trasporto verso la costa siciliana, hanno frequenza di occorrenza relativamente contenuta (circa il 10%). Percentuali più significative caratterizzano i venti provenienti dal primo quadrante (circa il 20%), responsabili del trasporto verso la costa settentrionale maltese. E' interessante notare la bassa frequenza (0.32%) associata ai venti molto intensi (>10 m/s) così come la percentuale contenute (7.37%) caratterizzante la classe di vento più bassa (<1 m/s), associabile alla calma di vento.

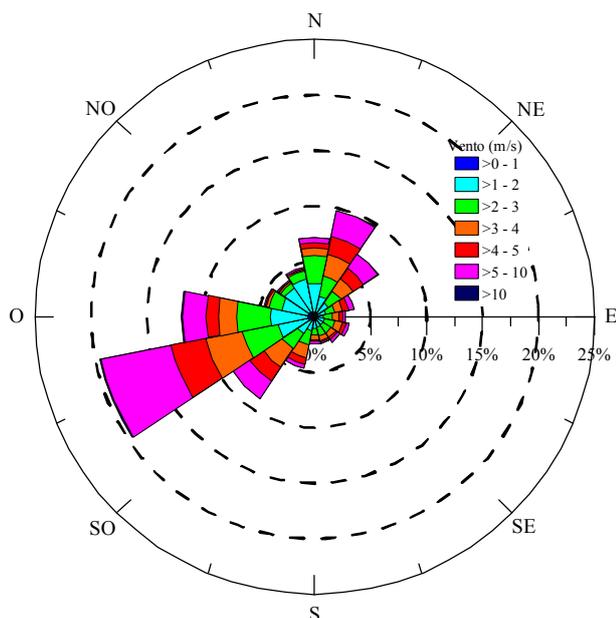


Figura 2.1 – Rosa dei venti relativa alla stazione meteorologica di Pachino (SR), anni 2006-2012.

Settore angolare	Classi di velocità (m/s)							Totali	Settore angolare
	<1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-10	>10		
0	0.46	2.61	2.51	0.7	0.44	0.43	0.00	7.15	N
22.5	0.37	1.56	1.81	2.02	1.65	2.34	0.07	9.82	NNE
45	0.38	1.18	1.3	1.31	1.13	1.54	0.04	6.88	NE
67.5	0.31	0.76	0.81	0.73	0.49	0.48	0.01	3.59	ENE
90	0.27	0.56	0.76	0.57	0.37	0.28	0.00	2.81	E
112.5	0.27	0.59	0.98	0.73	0.31	0.29	0.00	3.17	ESE
135	0.27	0.61	0.91	0.49	0.23	0.24	0.01	2.76	SE
157.5	0.33	0.64	0.83	0.42	0.17	0.08	0.00	2.47	SSE
180	0.4	0.67	0.68	0.37	0.2	0.19	0.00	2.51	S
202.5	0.42	0.93	1.3	1.19	0.58	0.35	0.01	4.78	SSO
225	0.53	1.32	1.72	1.95	1.52	1.83	0.01	8.88	SO
247.5	0.63	2.75	3.28	3.34	3.13	6.40	0.11	19.64	OSO
270	0.72	3.33	3.04	1.6	1.15	2.13	0.06	12.03	O
292.5	0.74	2.39	1.14	0.21	0.11	0.14	0.00	4.73	ONO
315	0.66	2.61	0.51	0.13	0.08	0.13	0.00	4.12	NO
337.5	0.61	2.97	0.71	0.15	0.08	0.11	0.00	4.63	NNO
Totali	7.37	25.48	22.29	15.91	11.64	16.96	0.32	100.00	

Tabella 2.1. – Frequenza di occorrenza dei venti suddivisi per classi di velocità e settori angolari (stazione meteorologica di Pachino (SR), anni 2006-2012). I numeri in rosso identificano i settori angolari e le classi di vento utilizzate nelle simulazioni idrodinamiche.

La Figura 2.2 riporta la rosa dei venti riferiti alla media mobile calcolata sull'arco temporale di 5 giorni, sempre riferita agli anni 2006-2012. Tale intervallo è confrontabile con il tempo necessario all'olio per raggiungere la costa siciliana,



nell'ipotesi di venti assunti costanti durante l'intero periodo di simulazione della dispersione. Si osserva una predominanza ancora maggiore degli eventi relativi alla direzione OSO rispetto al caso precedente (30% anziché il 20%), oltre ad una decisa attenuazione dell'intensità del vento, solo nello 0.5% dei casi superiore a 5 m/s. Tale risultato suggerisce che l'ipotesi di venti costanti appartenenti alla classe 5-10 m/s, che sarà assunta durante le simulazioni, rappresenta una condizione molto cautelativa per la valutazione dell'impatto a costa dell'olio.

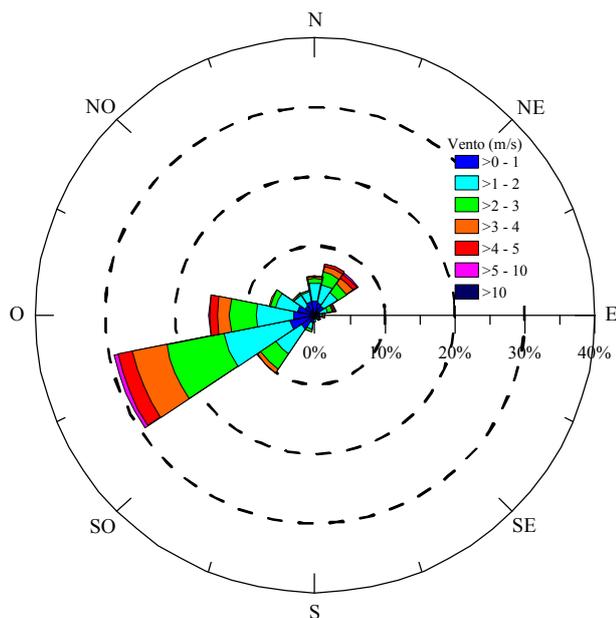


Figura 2.2 – Rosa dei venti corrispondente ai valori di velocità e direzione del vento riferiti alla media mobile calcolata su un periodo di 5 giorni (stazione meteorologica di Pachino (SR), anni 2006-2012).

Si riporta, infine, la rosa dei venti riferita alla stazione meteorologica sita in corrispondenza dell'aeroporto di Luqa (La Valletta), Malta (Figura 2.3). Si osserva una predominanza di venti appartenenti alla classe 5-10 m/s. Per ciò che riguarda la direzione di provenienza del vento più probabile, questa corrisponde al settore ONO, diversamente dal quanto accade nel sito di Pachino, dove il settore più ricco di eventi è OSO. Venti provenienti da ONO tendono comunque ad indirizzare l'olio lontano sia dalla costa siciliana sia da quella maltese. Per quanto riguarda gli altri settori di provenienza, le frequenze non si discostano in modo apprezzabile rispetto a quanto osservato nel sito di Pachino.

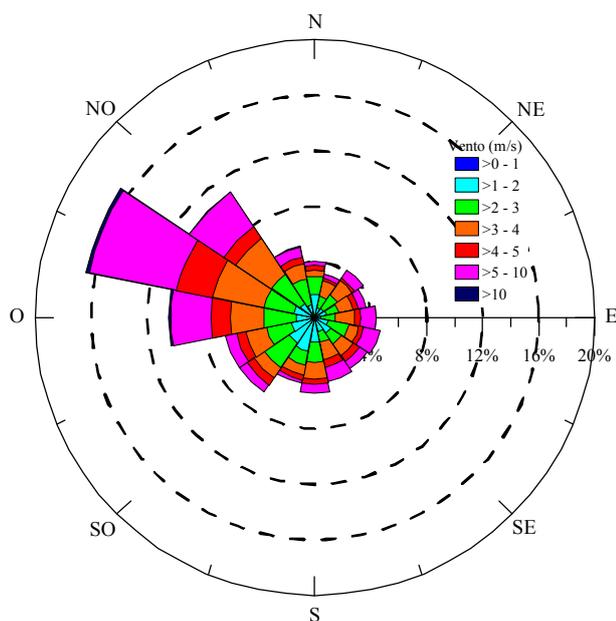


Figura 2.3 – Rosa dei venti relativa alla stazione meteorologica di Luqa (La Valletta), anni solari da 2006 a 2012.

2.2 Simulazioni idrodinamiche

Il POM (Princeton Ocean Model), realizzato da Blumberg e Mellor (1987) e successivamente implementato dalla comunità scientifica internazionale, è un modello di circolazione oceanico che risolve numericamente le equazioni primitive del moto. Le sue principali caratteristiche tecniche sono: superficie libera, griglia orizzontale curvilinea ortogonale, griglia verticale con coordinate sigma, modello di chiusura della turbolenza di Mellor-Yamada. Le coordinate sigma seguono il profilo batimetrico del fondo mantenendo lo stesso numero di livelli verticali, hanno quindi una spaziatura variabile con celle di calcolo tanto più alte quanto maggiore è la profondità del mare.

Utilizzando il POM è stata effettuata la simulazione idrodinamica su una porzione del canale di Sicilia prospiciente la costa meridionale siciliana. Tale area si estende ad Ovest fino alla longitudine di Agrigento, ad Est alla località di Plemmirio (SR) mentre è stato preso in considerazione un ampio braccio di mare a Sud dell'isola di Malta. Il dominio di applicazione del POM ricopre, dunque, un'area che si estende da $13,33^\circ$ a $15,33^\circ$ di longitudine Est e da $35,50^\circ$ a $37,40^\circ$ di latitudine Nord (Figura 2.4). La griglia di calcolo utilizzata è di 121×115 nodi nel piano orizzontale e di 21 livelli di profondità lungo la verticale in coordinate sigma. Il passo nella direzione della longitudine e della latitudine è di $1'$ ($1/60^\circ$), mentre lungo la verticale si è utilizzata una spaziatura irregolare, infittita in prossimità della superficie libera e del fondo. La batimetria è stata ricavata dal NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*).

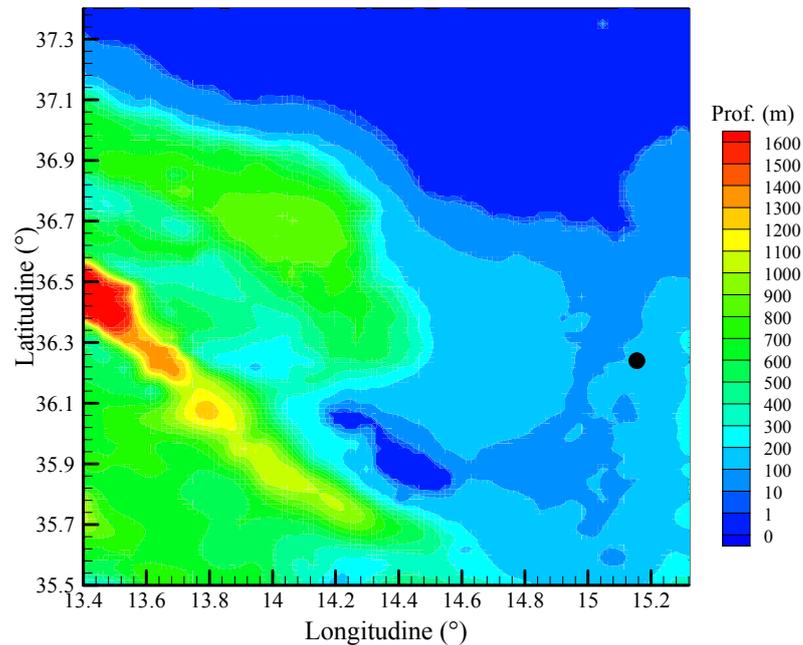


Figura 2.4 – Batimetria del dominio di calcolo. Il cerchio nero indica la posizione del pozzo Vesta.

Il POM è un modello *prognostico*, cioè si basa su valori iniziali di velocità, temperatura e salinità e determina la loro evoluzione sulla base delle condizioni imposte al contorno. Per questo sono stati forniti come input i profili iniziali di temperatura e salinità. L'analisi è stata eseguita con i profili climatologici relativi al primo periodo primaverile. Questa scelta è dettata da un criterio cautelativo che ci ha suggerito di escludere i mesi estivi, in quanto caratterizzati dal forte termoclino che ostacolerebbe la risalita dell'olio dal fondo.

Le condizioni al contorno adottate nella simulazione sono principalmente due:

- sforzo di trascinamento del vento sulla superficie libera;
- portata nella sezione aperta del dominio in corrispondenza del bordo a Nord-Ovest del dominio di calcolo.

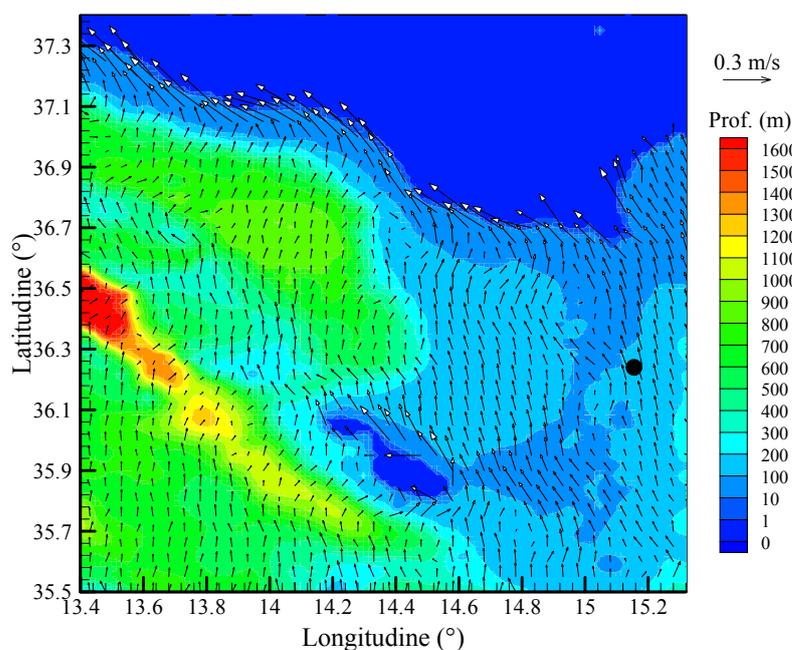
Per determinare l'azione di trascinamento del vento sono state considerate le condizioni di vento tratte dalle misure condotte presso la stazione meteorologica di Pachino descritte nel precedente paragrafo. Sulla base di quanto osservato, è stata predisposta una simulazione del campo idrodinamico corrispondente ad un vento proveniente da OSO con intensità costante pari a 7.5 m/s. Una seconda simulazione è stata condotta considerando il vento proveniente da NE, al fine di considerare la situazione ritenuta più gravosa per quanto riguarda l'arrivo dell'olio sulla costa settentrionale dell'isola di Malta. Una terza analisi è stata condotta imponendo un vento proveniente da SE, il quale facilita l'arrivo dell'olio lungo la costa meridionale siciliana. Anche per le due ultime simulazioni, l'intensità del vento è stata posta pari a 7.5 m/s. Pur se la probabilità di occorrenza dei suddetti casi è molto limitata



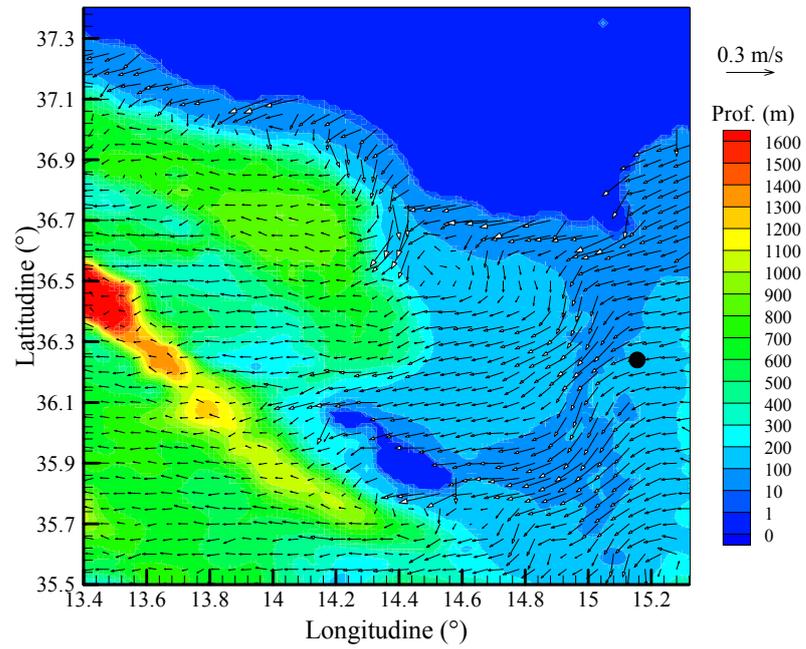
(rispettivamente 1.54% e 0.24%), è stato ritenuto opportuno condurre le analisi proprio in virtù della loro rilevanza dal punto di vista dell'impatto sulla costa.

Le condizioni al contorno per le correnti sono state assegnate al bordo nord-occidentale, basandosi sui dati ricavati attraverso campagne di misura condotte nel Canale di Sicilia (Vetrano et al., 2004). Lungo la costa meridionale della Sicilia si osserva durante il periodo considerato una corrente mediamente parallela alla costa, diretta verso SE, di intensità dell'ordine dei 20 cm/s.

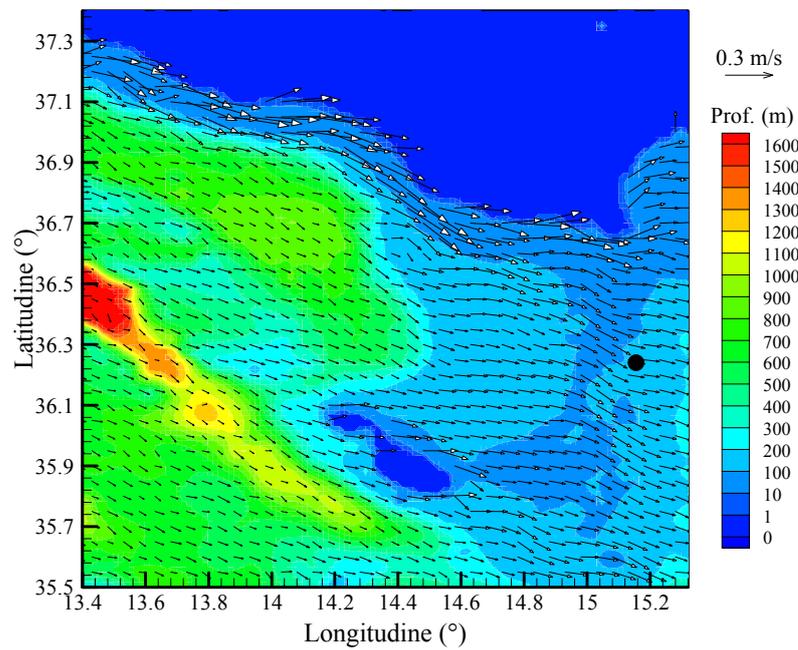
Le simulazioni idrodinamiche hanno una durata pari a 50 giorni. Per ognuno degli scenari, i campi di velocità e turbolenza calcolati dal POM sono stati registrati con cadenza esadimensionale, mentre il passo temporale di integrazione è di 1 secondo. Dall'analisi dell'energia cinetica del moto medio nell'intero dominio, si osserva il raggiungimento della stazionarietà del moto già dopo 5 giorni. Tale periodo serve all'avviamento della circolazione nell'intero bacino (spin-up). Per una maggiore affidabilità dei risultati si è considerato un avviamento della durata complessiva di 10 giorni, a partire dal quale sono stati considerati i campi utilizzati per valutare la dispersione degli inquinanti con il modello lagrangiano, che si è protratta per i 40 giorni successivi. In Figura 2.5 sono riportati i campi delle correnti superficiali corrispondenti ai tre scenari analizzati una volta raggiunte le condizioni di stazionarietà. Si osserva come la circolazione superficiale risenta in maniera sostanziale della presenza del vento, in grado di invertire il verso delle correnti anche in prossimità della linea di costa per lo scenario corrispondente al vento da SE (Figura 2.5a). Come nelle attese, nello scenario con vento da OSO la corrente superficiale è diretta verso il largo (Figura 2.5c), lontano dalle coste siciliane e maltesi. Al contrario, condizioni potenzialmente ben più gravose per il trasporto a costa risultano per i restanti due scenari.



(a)



(b)



(c)

Figura 2.5 – Campo di correnti superficiali per i tre scenari analizzati: (a) vento da SE, (b) vento da NE e (c) vento da OSO.



3 SIMULAZIONI DI OIL SPILL

Lo studio di impatto ambientale in mare ha lo scopo di prevedere, nelle condizioni meteo marine frequenti e sfavorevoli, la dinamica della dispersione di idrocarburi rilasciati in prossimità del pozzo esplorativo. In particolare si analizza il comportamento e il destino di due composti idrocarburici rilasciati nel Canale di Sicilia: gasolio in superficie e olio di grado API 23° in profondità.

Il petrolio e gli idrocarburi in generale, sono considerati inquinanti di tipo *non passivo*, a causa dell'attitudine a cambiare le caratteristiche originarie nel tempo successivo alla fuoriuscita. Per "*oil weathering*" si intendono tutti quei processi di degradazione che l'olio subisce a seguito dello sversamento. L'importanza che ognuno di tali processi riveste dipende dalle condizioni ambientali, dallo stato del mare e dal tipo di olio che caratterizza lo specifico caso di analisi.

L'impatto degli idrocarburi rilasciati in mare è stato valutato accoppiando il modello idrodinamico POM (Princeton Ocean Model) ed il modello lagrangiano LASEMOD (LAGrangian SEa MODel). Con il POM si sono simulate le correnti nel Canale di Sicilia e la turbolenza marina. I risultati ottenuti sono stati forniti come input al LASEMOD che ha determinato il trasporto, la dispersione e l'*oil weathering* degli idrocarburi rilasciati. I risultati restituiscono l'andamento nel tempo della chiazza oleosa, la posizione in cui si prevede l'arrivo a costa dell'inquinante e la quantità in massa dello stesso. Con il modello lagrangiano si sono valutati anche gli effetti prodotti da un intervento di mitigazione tramite l'utilizzo di barriere galleggianti (panne) e skimmer.

3.1 Descrizione degli scenari di oil spill

Nello studio vengono simulati gli scenari conseguenti alle perdite accidentali di idrocarburi in prossimità del pozzo esplorativo. Vengono considerati due casi di rilascio superficiale di gasolio e uno di perdita d'olio a fondo pozzo.

Le condizioni meteorologiche considerate sono quelle favorevoli al trasporto a costa, già descritte nel capitolo precedente, con vento di 7.5 m/s proveniente dai settori SE (diretto verso la costa siciliana) e NE (diretto verso la costa maltese). Si è considerata anche la condizione anemologica più frequente, che corrisponde alla direzione OSO.

Nella Tabella 3.1 sono riassunti i dati relativi ai nove scenari esaminati.

Il pozzo considerato è il "Vesta", ubicato a 120 m di profondità con coordinate geografiche: LAT. 36° 14' 19" N e LONG. 15° 09' 53" E (vedi Figura 2.3).

Per quanto riguarda l'olio, non si hanno informazioni sulla composizione chimica, si conosce comunque la densità, pari a 23° API.



Scenario/ Inquinante	Profondità. Rilascio	Durata Rilascio	Massa Rilascio	Portata Rilascio	Direzione. Vento
A1/gasolio	superficie	30 min	5 t	2.778 Kg/s	SE
A2/gasolio	superficie	30 min	700 t	388.89 Kg/s	SE
A3/olio	fondo	15 giorni	10920 t	8.426 Kg/s	SE
B1/gasolio	superficie	30 min	5 t	2.778 Kg/s	NE
B2/gasolio	superficie	30 min	700 t	388.89 Kg/s	NE
B3/olio	fondo	15 giorni	10920 t	8.426 Kg/s	NE
C1/gasolio	superficie	30 min	5 t	2.778 Kg/s	OSO
C2/gasolio	superficie	30 min	700 t	388.89 Kg/s	OSO
C3/olio	fondo	15 giorni	10920 t	8.426 Kg/s	OSO

Tabella 3.1 – Dati riassuntivi degli scenari simulati. La massa rilasciata negli scenari relativi all’olio corrisponde al rilascio di circa 5000 bl/d per 15 giorni. In tutti gli scenari considerati l’intensità del vento è di 7.5 m/s e la durata della simulazione è di 40 giorni.

3.1.1 Il modello LASEMOD

Il LASEMOD è un modello di dispersione lagrangiano sviluppato presso il dipartimento DICEA (Leuzzi e Purini, 2005; Monti e Leuzzi, 2010). L’algoritmo fondamentale del modello è basato sulla condizione di “well-mixed” (Thomson, 1987), che garantisce il mescolamento corretto dell’inquinante anche in condizioni di forti gradienti dell’energia cinetica turbolenta. Il modello si presta quindi alle applicazioni nelle zone costiere e consente di simulare le traiettorie delle particelle inquinanti in campi idrodinamici tridimensionali. Al contrario di altri modelli di dispersione (ad esempio il MEDSLIK) tiene conto della scala di correlazione temporale tra le velocità lungo le traiettorie. In termini pratici questa caratteristica gli consente di simulare correttamente anche la dispersione dovuta a grandi strutture vorticose, che non potrebbero essere trattate in assenza delle informazioni sulla correlazione temporale. La presenza di strutture vorticose con scale di correlazione temporale dell’ordine di alcune ore si verifica frequentemente nel Mar Mediterraneo (De Dominicis et al., 2012).

Il LASEMOD è accoppiato con il modello idrodinamico POM, del quale utilizza oltre ai campi tridimensionali delle velocità, l’energia cinetica turbolenta e la diffusività.

Nel modello di dispersione si tiene conto anche del drift di Stokes, dovuto dall’effetto delle onde sugli inquinanti. Questo fenomeno produce un movimento medio dell’inquinante nella direzione del vento. Alla sua origine c’è la differenza di velocità della particella di fluido durante il moto orbitale prodotto dall’onda. Quando la particella è sulla cresta dell’onda ha una velocità maggiore rispetto all’istante in cui è nel cavo. Poiché le traiettorie non sono chiuse viene definita una velocità media attraverso la differenza tra la posizione iniziale e la posizione finale della particella divisa per il periodo d’onda.



Si può notare che la velocità di deriva di Stokes influenza in modo significativo solo gli strati superficiali in quanto dipendente dall'azione del vento, che si attenua sino a valori prossimi allo zero, o comunque trascurabili, al di sotto della superficie del mare.

Il comportamento del petrolio in mare, oltre che dalle correnti idrodinamiche, è determinato dai processi di degradazione. Nel LASEMOD sono presenti alcune routine che simulano i processi più rilevanti dell'oil weathering. Nel seguito vengono descritti i vari processi e la configurazione adottata per trattare gli idrocarburi del caso in esame anche durante la fase di risalita del *blowout*.

3.1.1.1 Simulazione dell'oil weathering

Il *weathering*, cioè la somma delle alterazioni del prodotto petrolifero inizialmente sversato, dipende dalle proprietà chimiche e fisiche dell'olio, dalle condizioni ambientali e quelle di rilascio. Questi fattori sono correlati tra loro ed è la loro combinazione che caratterizza il comportamento dei differenti oli secondo diverse modalità.

I processi subiti dall'olio dopo il rilascio in mare possono essere suddivisi in tre categorie.

La prima comprende quelli che hanno luogo in breve tempo e che hanno conseguenze rapide sul comportamento del greggio. Tali processi includono la dispersione superficiale, l'evaporazione e la formazione di emulsioni. In alcuni testi tra i vari processi della prima categoria viene considerata anche la dispersione nella colonna d'acqua, nel modello LASEMOD la dispersione turbolenta viene trattata esplicitamente nel calcolo delle traiettorie delle singole particelle.

Altri meccanismi di degradazione avvengono più lentamente e sono importanti per studi sugli effetti a lungo termine. Tra questi rientrano la foto-ossidazione e la biodegradazione. Infine ci sono quei processi che necessitano di particolari condizioni ambientali per verificarsi, come la sedimentazione e l'interazione olio-ghiaccio.

Di tutti i processi si è scelto di considerare solo quelli i cui tempi di azione e la cui importanza, in termine di ordine di grandezza, risulti significativa per l'analisi richiesta, ovvero quelli appartenenti alla prima categoria.

- SPREAD

È un fenomeno di dispersione superficiale che si differenzia da quello prodotto dalla turbolenza marina. Non è propriamente un processo di degradazione dell'olio, ma coinvolge sia le proprietà fisiche del prodotto fuoriuscito che lo stato ambientale della superficie dell'acqua sulla quale si muove.

È importante notare che l'olio si disperde sulla superficie di un corpo d'acqua anche senza forze esterne quali le correnti o l'azione del vento. Da qui le prime formulazioni del fenomeno, i cui fattori di influenza sono la forza di gravità e la tensione interfacciale tra olio e acqua e dove la viscosità dell'olio e l'inerzia sono considerate le forze ritardanti della dispersione (Fay, 1971). D'altro canto però, ogni sforzo di taglio



sulla corrente superficiale causa uno *stretching* e anche l'azione di un vento debole può causare un ispessimento della chiazza d'olio nella direzione del vento. Lehr et al. (1984) apportarono poi delle modifiche alla formula di Fay (1971), ipotizzando un'iniziale dispersione di forma ellittica che tenesse conto della direzione prevalente del vento. Nel modello LASEMOD viene simulato l'effetto dello spread secondo la formulazione di Lehr et al. (1984).

- EVAPORAZIONE

L'evaporazione è forse il processo di degradazione che tra tutti riveste la maggior importanza ai fini della degradazione del petrolio. In un periodo temporale di appena pochi giorni, il processo evaporativo può contribuire a diminuire significativamente il volume originariamente sversato, fino a dimezzarne la quantità. Per modellare l'evaporazione del gasolio si è utilizzata l'equazione di Shen e Yapa (1988), in cui si considera che il tasso di evaporazione è funzione della pressione di vapore, delle caratteristiche degli idrocarburi considerati e delle caratteristiche della chiazza sversata, oltre che del tempo e della temperatura dell'ambiente. Per quanto riguarda l'oil spill di fondo pozzo, non conoscendo le caratteristiche chimiche dell'olio, si è fatto riferimento a leggi di evaporazione (Fingas, 2013) ottenute per oli con densità prossima ai 23° API dell'olio in esame. Nella Figura 3.1 viene rappresentata la curva di evaporazione per gli idrocarburi considerati.

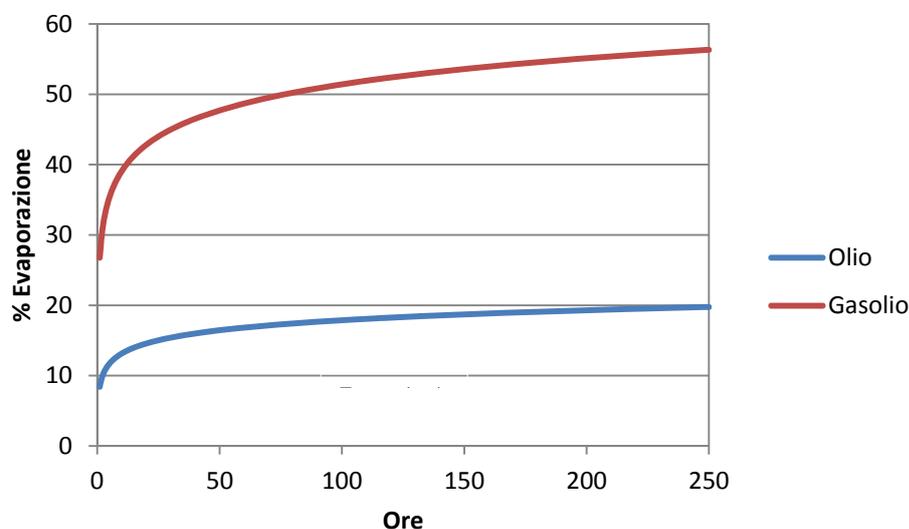


Figura 3.1 - Percentuale evaporata nel tempo per gli idrocarburi considerati.

- FORMAZIONE DI EMULSIONI

Il processo di emulsificazione può essere immaginato come l'inverso di quello di dispersione. Non sono le particelle di olio a disperdersi nell'acqua, ma piuttosto è



l'acqua ad essere "intrappolata" nell'olio. Questo può causare un significativo aumento di volume, densità e, in particolare, di viscosità della chiazza oleosa. Non è raro che la viscosità di un olio che ha subito tale processo, possa essere di due o tre ordini di grandezza superiore rispetto all'olio iniziale. Questa conseguenza ha importanti applicazioni sulle operazioni di pulitura, che potrebbero rivelarsi inefficaci per un olio troppo viscoso.

La formazioni di emulsioni, al contrario dell'evaporazione o della dispersione superficiale, non è fenomeno a cui l'olio sarà sicuramente soggetto, ma potrebbe esserlo al variare delle condizioni. Può accadere, infatti, che l'olio formi emulsioni in tempi brevi, o solo a seguito di una della perdita dei componenti più leggeri per evaporazione, o avvenire ad un certo momento per il cambiamento delle condizioni del mare. Da notare che rivestono un ruolo importante due fattori: quello della presenza nell'olio di particolari composti, come asfalteni e resine, e il perpetuarsi di determinate altezze di onda del mare che innescano il fenomeno. Gli oli leggeri di solito non formano emulsioni poiché non contengono quei componenti idrocarburici capaci di stabilizzare le particelle di acqua nell'olio. Recenti studi (Fingas e Fieldhouse, 2004; Fingas e Fieldhouse, 2005) assegnano per un dato olio una classe di stabilità dell'emulsione che possono formare: stabile, mesostabile, instabile. L'emulsione non-stabile è caratterizzata dal fatto che l'acqua non riesce ad essere trattenuta, in quantità significativa, nell'olio.

Per quanto riguarda le emulsioni, il gasolio è considerato, insieme con gli oli più leggeri, di tipo instabile, si è quindi trascurata la formazione di emulsioni, rispetto agli altri processi di degradazione. Per l'olio che risale dal fondo del pozzo, non si conoscevano i dati necessari per determinarne l'indice di instabilità, non si è potuto quindi implementare un modello di formazione delle emulsioni.

3.1.1.2 *Risalita del plume*

Mentre la simulazione della dispersione in superficie riguarda un olio leggero e dal comportamento pressoché noto, la perdita al fondo del pozzo esplorativo coinvolge un olio i cui componenti seguono dinamiche diverse.

Quando un inquinante composto da gas e olio viene rilasciato ad elevate profondità (in genere maggiori di 500 metri) bisogna tenere in considerazione quattro diverse fasi: l'olio, il gas, l'acqua e gli idrati, che hanno un comportamento interdipendente. In genere, si assume che:

- l'idrodinamica dell'ambiente non sia influenzata dalla risalita del plume, essendo il plume molto piccolo se comparato alla vastità del mare o dell'oceano;
- la dissoluzione dell'olio si ritiene trascurabile poiché relativamente bassa, e, in ogni caso la quantità di olio disciolto non è importante ai fini del trasporto o del comportamento dell'olio, quanto lo è ai fini della valutazione della tossicità;
- la dissoluzione di gas e la formazione di idrati deve essere tenuta in considerazione;
- la risalita del plume si compone di due fasi, la prima in cui la dinamica del plume è dominata dalla quantità di moto associata alla velocità di fuoriuscita del getto, e la seconda in cui questo effetto si esaurisce e domina la forza di galleggiamento.



Queste condizioni sono alla base del modello utilizzato per la risalita del plume, tranne per il fatto che nel caso di studio non si considera alcuna velocità in uscita, ottenendo una dinamica del plume governata dalle forze di galleggiamento. La conoscenza profonda del fenomeno del blowout, necessita ancora di ulteriori studi approfonditi, ma si può affermare che i componenti più leggeri o vengono trattenuti nel mare in forma disciolta a medie profondità, o se riescono ad arrivare in superficie, volatilizzano. Al fine di valutare la dispersione dell'olio e il suo possibile arrivo a costa, queste componenti leggere non subiranno tale processo, e la loro perdita si traduce in un aumento di densità da attribuire al plume e quindi all'olio.

Un'ultima questione è quella relativa alla formazione di idrati. Questi derivano dalla reazione tra gas, quali il metano, e l'acqua che formano uno stato solido, simile al ghiaccio, che avviene a temperature ben al di sopra del normale punto di congelamento dell'acqua, quando i gas (formanti gli idrati) entrano in contatto con l'acqua ad alte pressioni. Le condizioni operative, confrontate con quanto riportato nel caso di studi sperimentali (Yapa et al., 2010), sostengono l'ipotesi di assenza di formazioni di idrati nel caso in esame, caratterizzato da profondità relativamente basse e temperature non eccessivamente basse.

Riassumendo, le ipotesi fatte per ricavare il modello che schematizzi il comportamento dell'olio fuoriuscito dal pozzo in profondità sono: dinamica del plume basata sulle sole forze di galleggiamento; presenza di corrente trasversale; assenza della formazione di idrati.

Nel modello LASEMOD la risalita delle particelle da fondo pozzo viene simulata utilizzando una serie di algoritmi basati sull'applicazione della teoria della similitudine del plume galleggiante di Batchelor (1954), ai modelli statistici lagrangiani.

3.2 Risultati delle simulazioni di Oil Spill

Seguendo lo schema degli scenari indicato nella Tabella 3.1 si sono realizzate le varie simulazioni di oil spill. I run sono stati realizzati con il modello LASEMOD a cui sono stati forniti come input i dati delle sorgenti ed il campo idrodinamico precedentemente calcolato con il POM.

Per tutte le simulazioni si è utilizzato un dominio con origine e dimensioni complessive coincidenti con quelle adottate per la simulazione idrodinamica (vedi Figura 2.4). Comunque, per avere un maggiore dettaglio sui risultati di concentrazione, si è utilizzata una risoluzione 5 volte maggiore rispetto ai risultati delle correnti. Le celle di calcolo orizzontali del LASEMOD sono quindi quadrate con lato di 12". La suddivisione orizzontale ottenuta per il dominio complessivo è di 605x575 celle, mentre lungo la verticale si è utilizzato il sistema di coordinate sigma con la stessa suddivisione adottata per il POM. Il passo temporale utilizzato per l'integrazione delle traiettorie lagrangiane è di 25s.

Di seguito vengono riportati i risultati ottenuti per gli scenari considerati. Per ciascun caso si è realizzata anche la simulazione che considera lo scenario conseguente ad un



intervento di mitigazione. Per massimizzare l'azione di recupero, si è ipotizzata la periodica e completa rimozione del petrolio contenuto nello strato più superficiale del mare (dalla superficie sino ad 1m di profondità), per mezzo di barriere galleggianti multiple ed in movimento continuo. Si è assunto un istante di partenza delle operazioni di contenimento e raccolta dopo 48 ore dall'inizio del rilascio accidentale.

3.2.1 Scenario A1

Il primo scenario è riferito al caso della perdita di 5t di gasolio in prossimità della piattaforma di perforazione con vento da SE, favorevole al trasporto verso le coste siciliane. Il rilascio avviene sulla superficie del mare in un tempo di 30 min. La simulazione si protrae per 40 giorni a partire dall'istante del rilascio. Nelle Figure da 3.2 a 3.6 viene rappresentata l'evoluzione della macchia di gasolio durante la simulazione. I campi di concentrazione areale mostrati nei grafici sono calcolati sommando tutta la massa di inquinante contenuta nella colonna d'acqua (dalla superficie sino al fondo) e dividendo per l'area della cella orizzontale.

Dal momento che il rilascio avviene in superficie, quasi tutto il gasolio è presente nei primi metri di profondità. All'effetto della turbolenza che disperde l'inquinante nell'acqua al di sotto della superficie libera, si oppone il galleggiamento che tende a riportarlo in superficie.

L'allargamento della macchia dopo 2 giorni (Figura 3.2) è dovuto all'effetto combinato dello spread superficiale ed alle componenti orizzontali della turbolenza. Man mano che la macchia si avvicina alla costa tende a ruotare e ad allungarsi nella direzione della corrente che diventa più intensa sui bassi fondali. Dopo 6 giorni il gasolio arriva in prossimità della costa (Figura 3.4). La macchia subisce uno stiramento dovuto sia all'incremento di velocità in prossimità della costa, sia al drift di Stokes che spinge l'inquinante verso costa, accumulandolo e favorendo lo spiaggiamento (Figure 3.5 e 3.6). Dai risultati della simulazione completa emerge che dopo meno di 10 giorni tutto il gasolio è spiaggiato. L'analisi quantitativa di questo fenomeno viene descritta nel paragrafo 3.2.2, che si riferisce allo stesso scenario, ma con una portata di gasolio 140 volte maggiore.

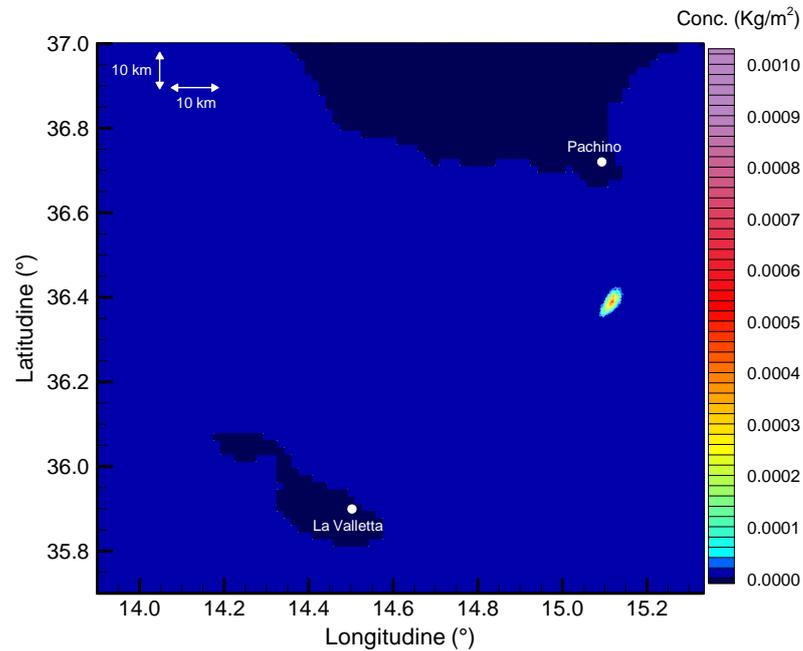


Figura 3.2 – Scenario A1 - Distribuzione spaziale della concentrazione areale di gasolio calcolata sommando tutta la massa di inquinante contenuta nella colonna d'acqua dopo 2 giorni dal rilascio.

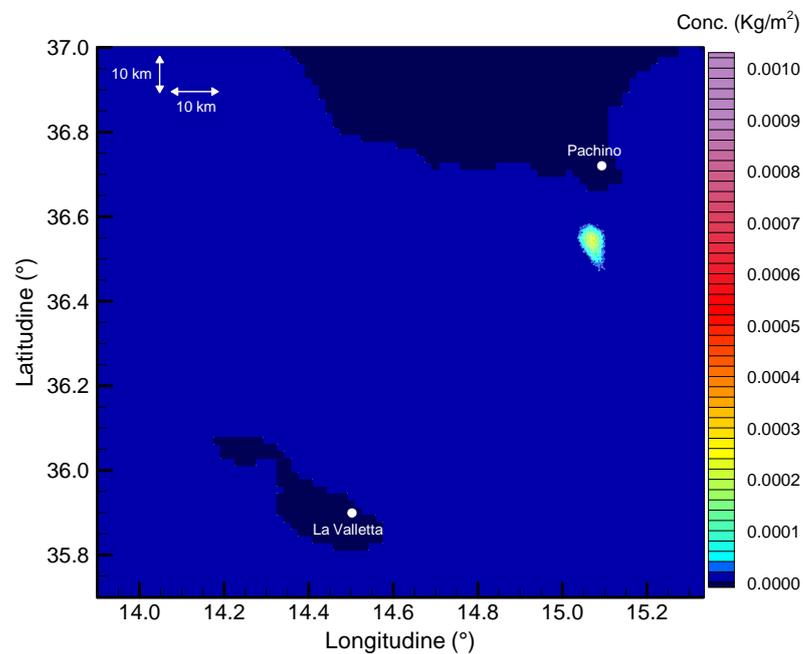


Figura 3.3 – Scenario A1 - Distribuzione spaziale della concentrazione areale di gasolio calcolata sommando tutta la massa di inquinante contenuta nella colonna d'acqua dopo 4 giorni dal rilascio.

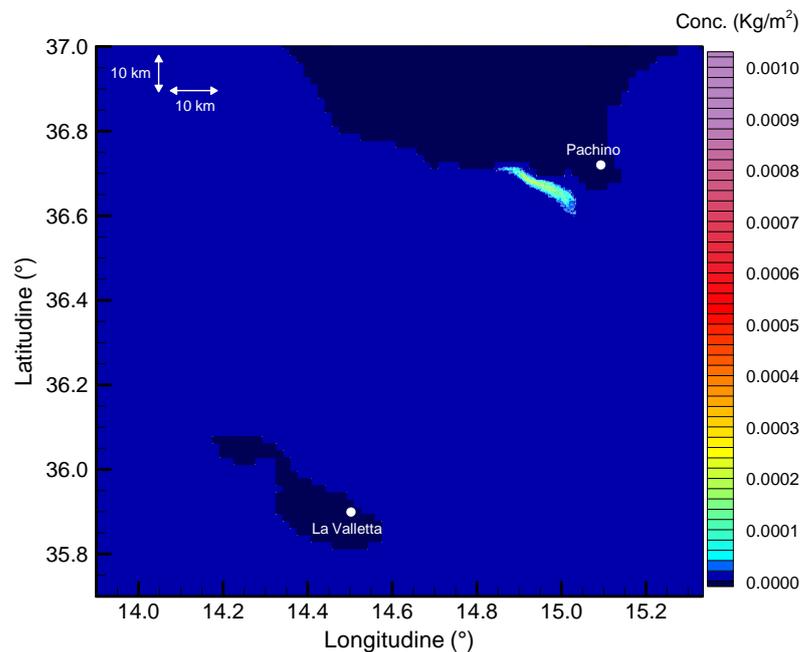


Figura 3.4 – Scenario A1 - Distribuzione spaziale della concentrazione areale di gasolio calcolata sommando tutta la massa di inquinante contenuta nella colonna d'acqua dopo 6 giorni dal rilascio.

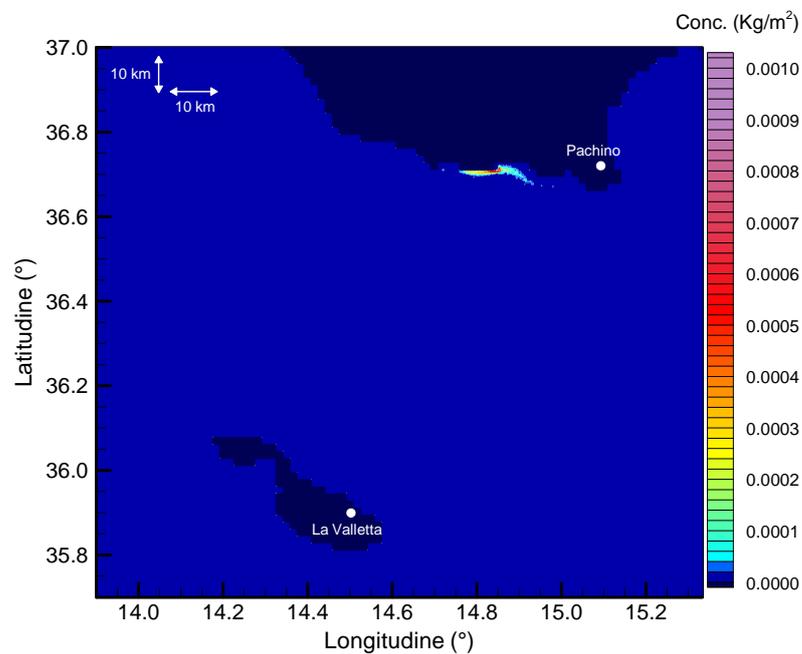


Figura 3.5 – Scenario A1 - Distribuzione spaziale della concentrazione areale di gasolio calcolata sommando tutta la massa di inquinante contenuta nella colonna d'acqua dopo 7 giorni dal rilascio.

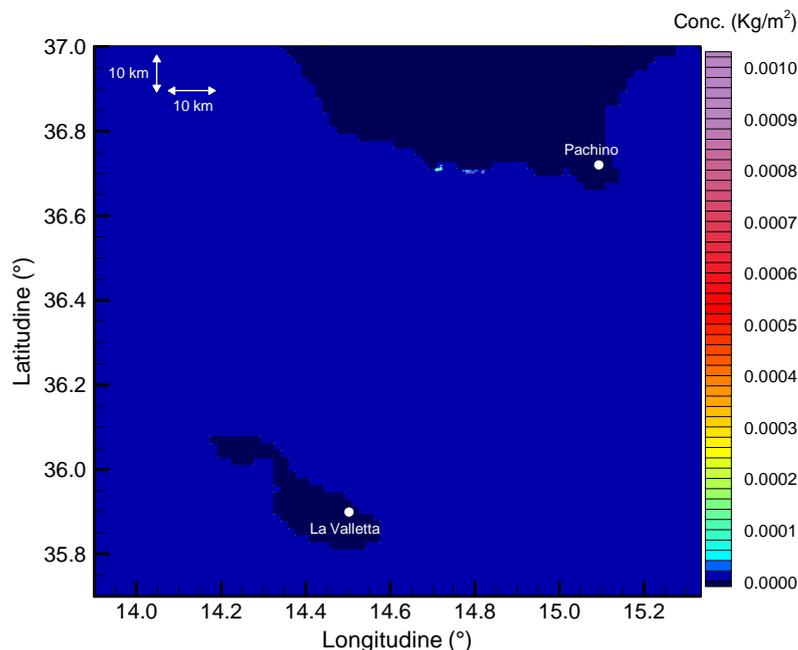


Figura 3.6 – Scenario A1 - Distribuzione spaziale della concentrazione areale di gasolio calcolata sommando tutta la massa di inquinante contenuta nella colonna d'acqua dopo 8 giorni dal rilascio.

3.2.1.1 Intervento di mitigazione

Si sono analizzati gli effetti prodotti da un intervento di mitigazione realizzato con l'impiego di barriere galleggianti multiple e in movimento continuo. L'ipotesi fatta è che le barriere possano rimuovere periodicamente (ogni 6 ore) tutto il gasolio contenuto nello strato di mare, dalla superficie libera sino alla profondità di 1m.

Nelle Figure 3.7 e 3.8 si riportano le mappe di concentrazione ottenute durante l'intervento di mitigazione, nel quarto e settimo giorno. Dal confronto con le figure precedenti, è evidente l'effetto di rimozione dello skimmer, il valore massimo viene ridotto notevolmente (la scala della legenda è stata modificata di un fattore 10 per rendere visibile le mappe di concentrazione). È utile sottolineare che l'incompleta rimozione del gasolio non è dovuta ad una negligenza nell'attuazione delle procedure di raccolta dell'idrocarburo, ma al fatto che il moto ondoso disperde parzialmente l'inquinante nella colonna d'acqua a profondità superiori a quelle delle barriere. La parte di questo gasolio che risale per effetto della dispersione e del galleggiamento viene raccolto nelle 6 ore successive. Nella Figura 3.10 viene mostrata la portata di rimozione dello skimmer in funzione del tempo. Si osserva un picco della portata all'inizio dell'intervento a cui seguono valori prossimi allo zero non percettibili alla scala del grafico.

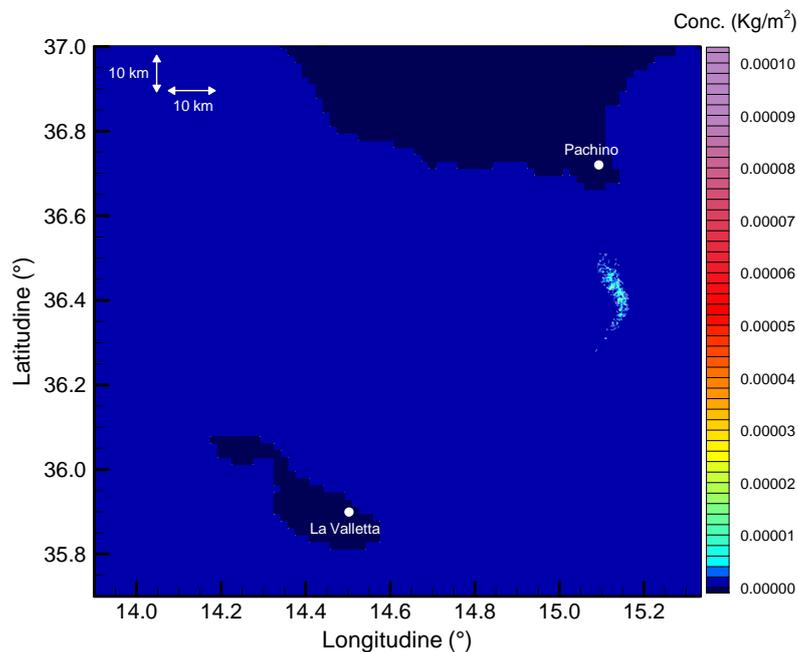


Figura 3.7 – Scenario A1 - Distribuzione spaziale della concentrazione areale di gasolio calcolata sommando tutta la massa di inquinante contenuta nella colonna d'acqua dopo 4 giorni dal rilascio, con intervento di mitigazione.

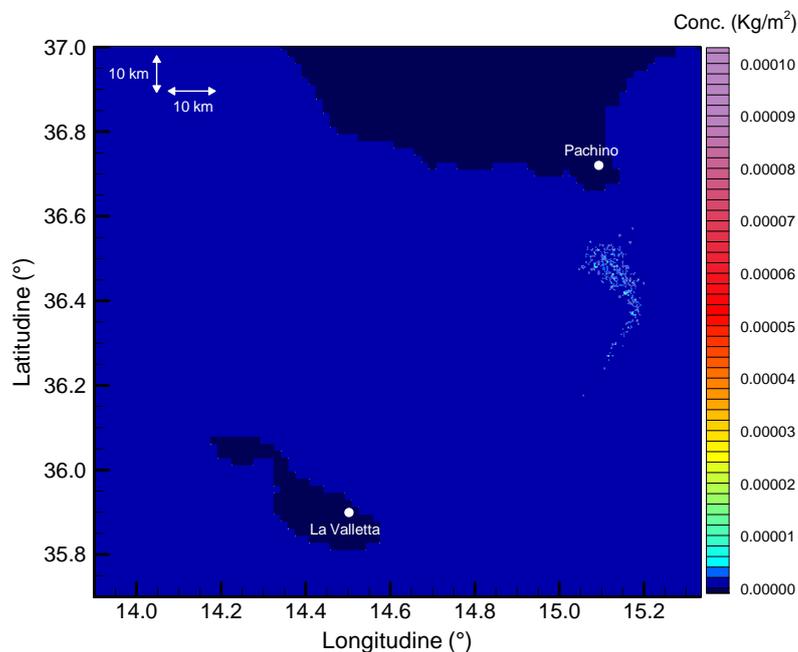


Figura 3.8 – Scenario A1 - Distribuzione spaziale della concentrazione areale di gasolio calcolata sommando tutta la massa di inquinante contenuta nella colonna d'acqua dopo 7 giorni dal rilascio, con intervento di mitigazione.

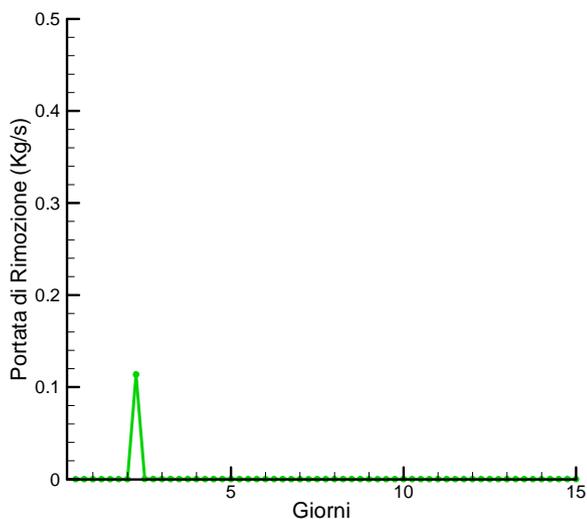


Figura 3.9 – Scenario A1 – Andamento temporale della portata di rimozione del gasolio, ottenibile con le barriere galleggianti utilizzate nella simulazione.

3.2.2 Scenario A2

Nel secondo scenario con vento da SE, si considera un rilascio di 700 t di gasolio in prossimità della piattaforma di perforazione. Anche in questo caso il rilascio avviene sulla superficie del mare in un tempo di 30 min. La simulazione si riferisce ad un periodo di 40 giorni a partire dall'istante del rilascio. L'evoluzione temporale della macchia di gasolio viene rappresentata nelle Figure da 3.10 a 3.14. I campi ottenuti sono simili a quelli dello scenario precedente salvo per il fatto che, in seguito al forte aumento della massa di gasolio rilasciata, la concentrazione è molto più elevata (si può notare che la scala delle concentrazioni nella legenda è stata aumentata di 2 ordini di grandezza). Le considerazioni generali sull'evoluzione della macchia sono analoghe a quelle fatte precedentemente.

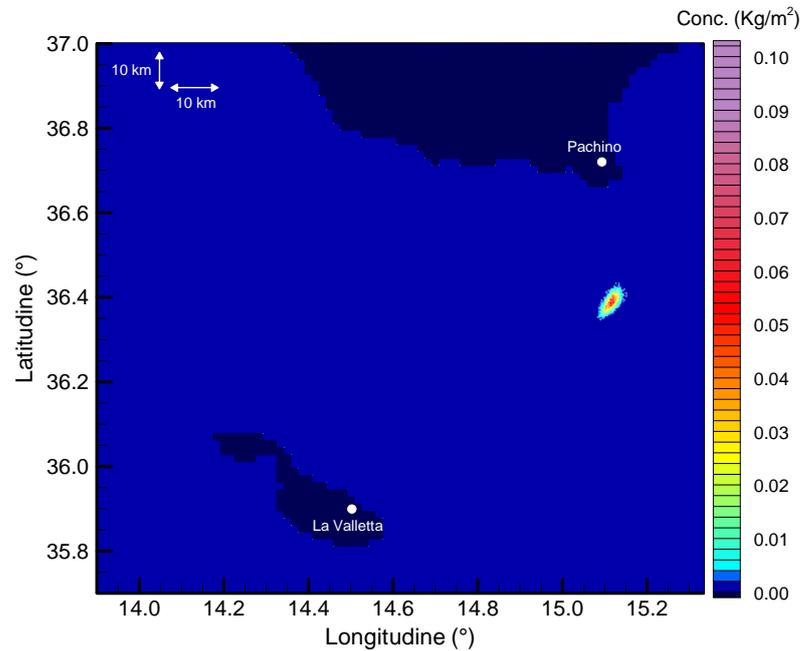


Figura 3.10 – Scenario A2 - Distribuzione spaziale della concentrazione areale di gasolio calcolata sommando tutta la massa di inquinante contenuta nella colonna d'acqua dopo 2 giorni dal rilascio.

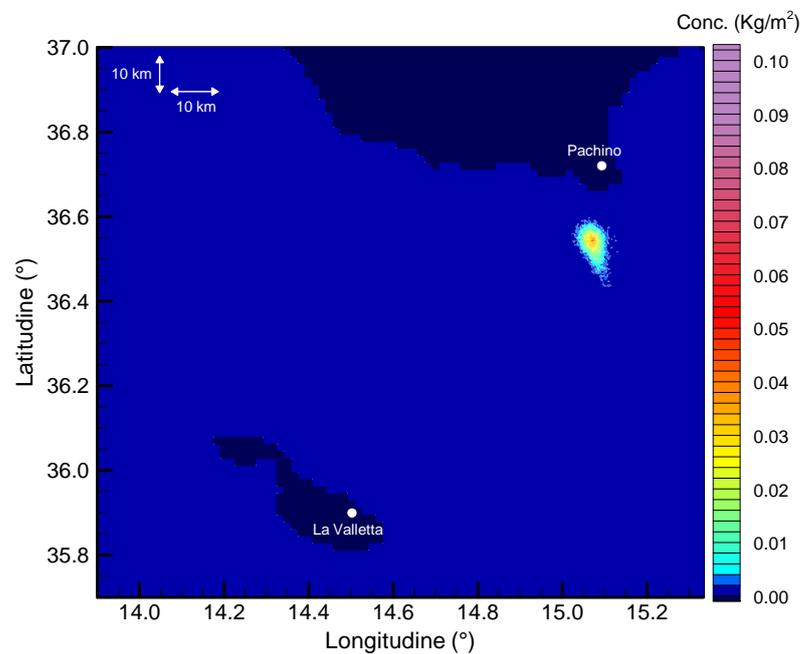


Figura 3.11 – Scenario A2 - Distribuzione spaziale della concentrazione areale di gasolio calcolata sommando tutta la massa di inquinante contenuta nella colonna d'acqua dopo 4 giorni dal rilascio.

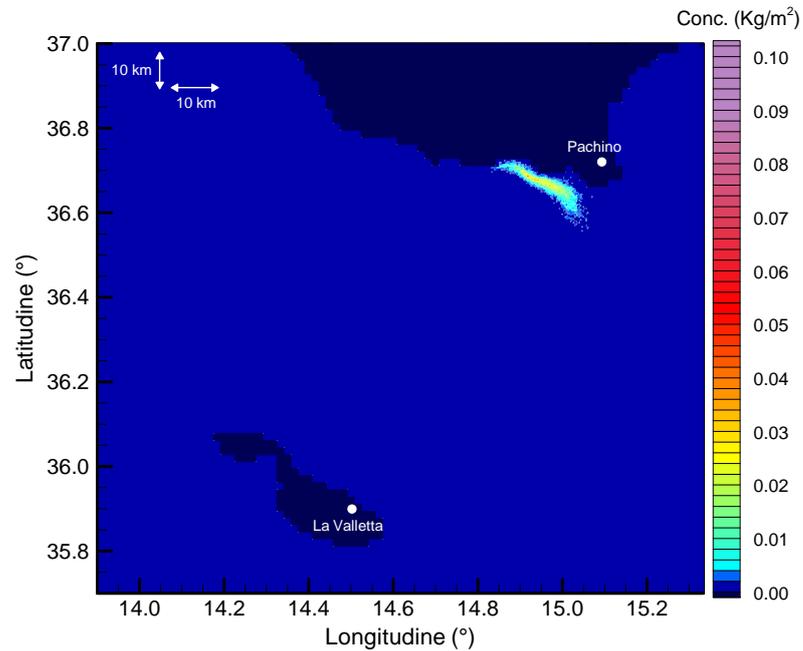


Figura 3.12 – Scenario A2 - Distribuzione spaziale della concentrazione areale di gasolio calcolata sommando tutta la massa di inquinante contenuta nella colonna d'acqua dopo 6 giorni dal rilascio.

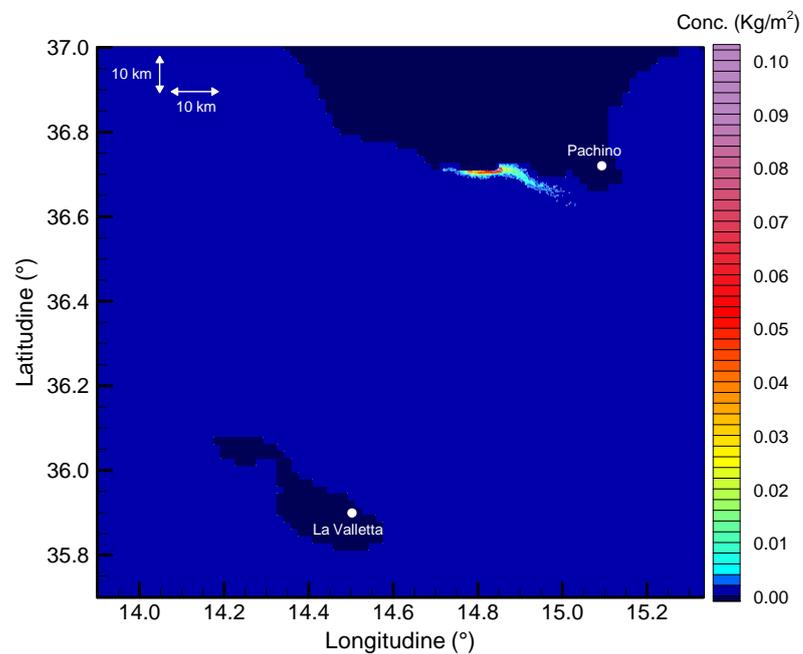


Figura 3.13 – Scenario A2 - Distribuzione spaziale della concentrazione areale di gasolio calcolata sommando tutta la massa di inquinante contenuta nella colonna d'acqua dopo 7 giorni dal rilascio.

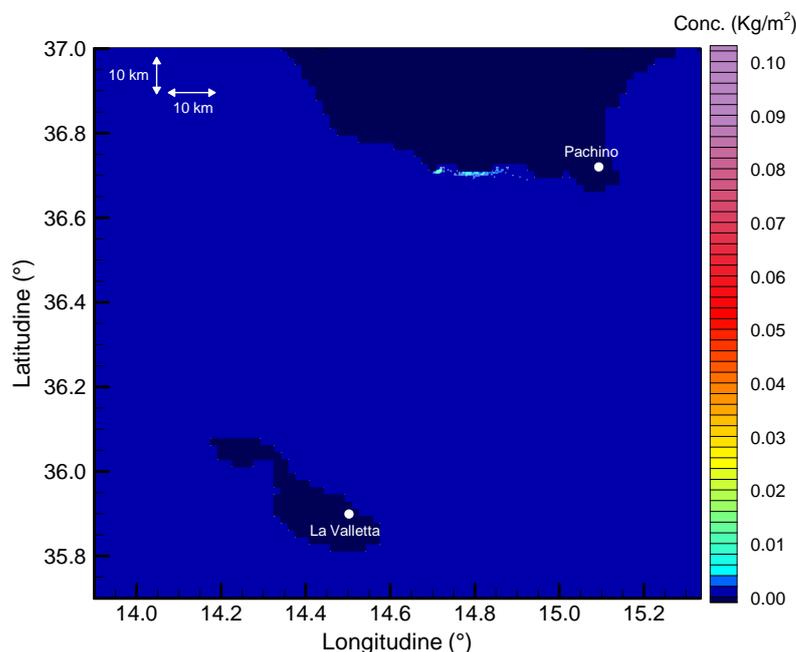


Figura 3.14 – Scenario A2 - Distribuzione spaziale della concentrazione areale di gasolio calcolata sommando tutta la massa di inquinante contenuta nella colonna d'acqua dopo 8 giorni dal rilascio.

3.2.2.1 Intervento di mitigazione

Anche in questo caso si sono simulati gli effetti prodotti da un intervento di mitigazione realizzato con l'impiego di barriere galleggianti. La tecnica ipotizzata per le barriere è la stessa già descritta.

Nelle Figure 3.15 a 3.16 sono mostrate le mappe di concentrazione ottenute durante l'intervento di mitigazione, del quarto e settimo giorno. Anche in questo caso la presenza della barriera riduce notevolmente la quantità di gasolio in mare. La portata di rimozione dello skimmer è riportata in Figura 3.17. L'andamento differisce dallo scenario precedente per un fattore di scala, che è esattamente il rapporto tra le due masse complessivamente sversate nei due casi considerati.

L'effetto di mitigazione si traduce nel quasi totale annullamento dello spiaggiamento (Figura 3.18). L'unico episodio si verifica durante il 30esimo giorno con una massa spiaggiata inferiore di quattro ordini di grandezza rispetto al caso non mitigato.

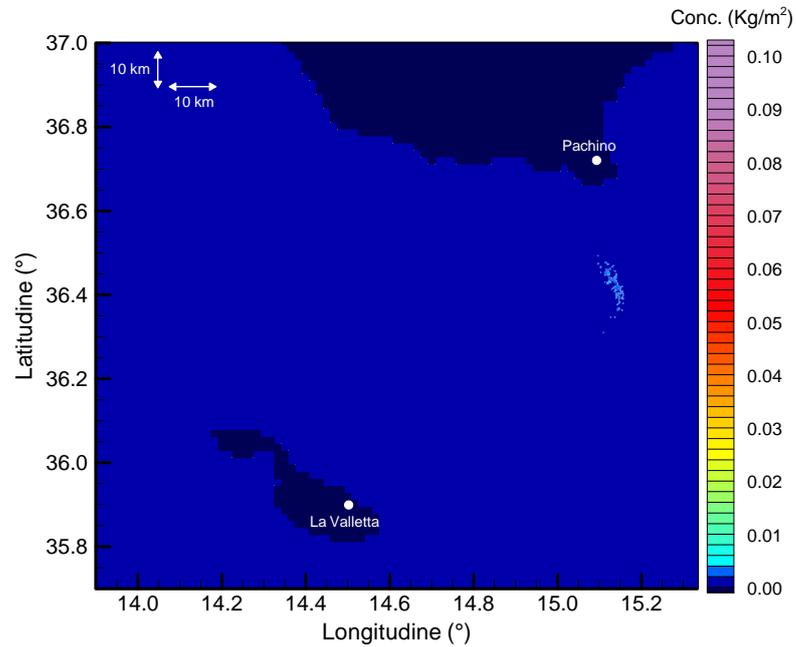


Figura 3.15 – Scenario A2 - Distribuzione spaziale della concentrazione areale di gasolio calcolata sommando tutta la massa di inquinante contenuta nella colonna d'acqua dopo 4 giorni dal rilascio, con intervento di mitigazione.

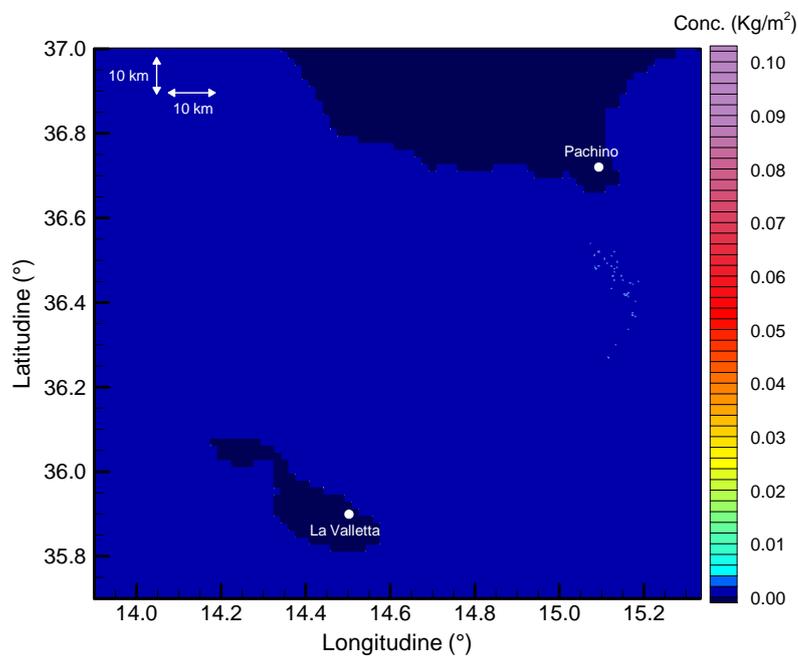


Figura 3.16 – Scenario A2 - Distribuzione spaziale della concentrazione areale di gasolio calcolata sommando tutta la massa di inquinante contenuta nella colonna d'acqua dopo 7 giorni dal rilascio, con intervento di mitigazione.

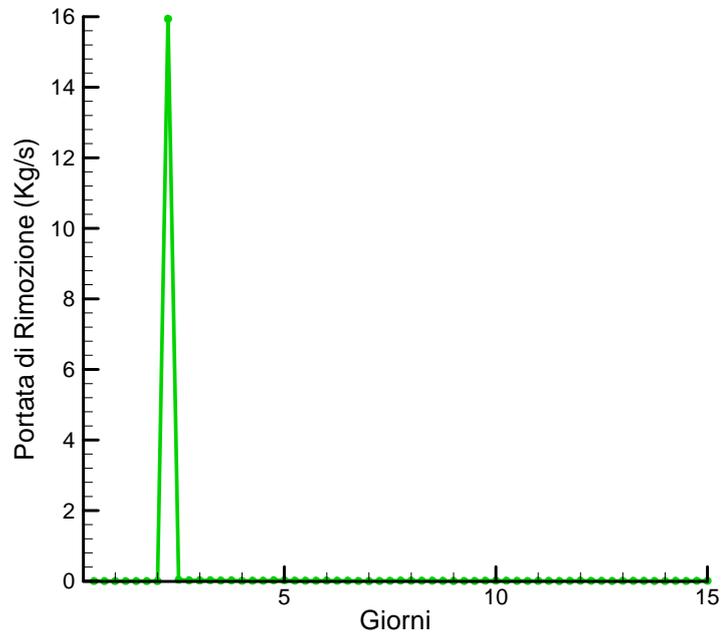


Figura 3.17 – Scenario A2 – Andamento temporale della portata di rimozione del gasolio, ottenibile con la barriera galleggiante utilizzata nella simulazione.

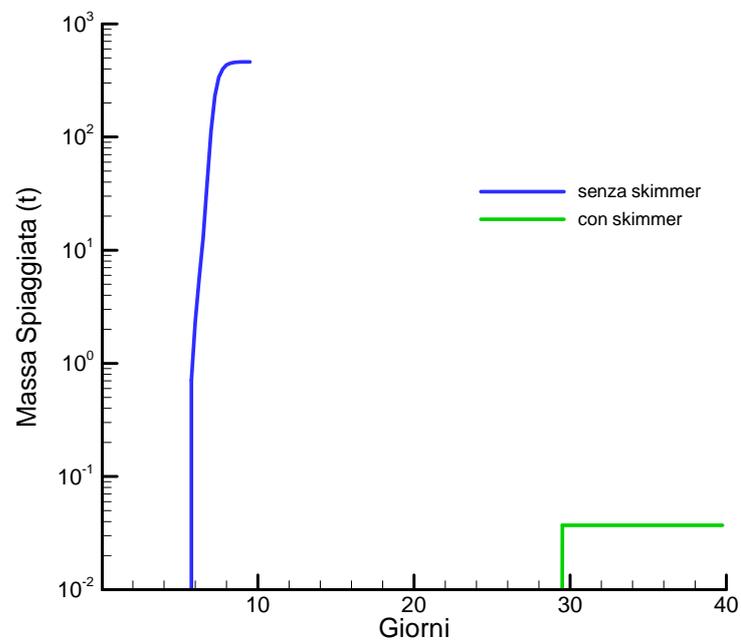


Figura 3.18 – Scenario A2 – Massa di gasolio spiaggiata durante il periodo simulato. La presenza delle barriere galleggianti con skimmer riduce la massa spiaggiata di 4 ordini di grandezza.



3.2.3 Scenario A3

Il terzo scenario con vento da SE si riferisce ad un evento di blowout del greggio, che risalirebbe con portata continua per una durata di 15 giorni. In seguito al prolungato rilascio, sia pure di portata inferiore ai casi precedenti, si ottiene una massa totale sversata quasi 16 volte superiore a quella del secondo scenario (Tabella 3.1). La simulazione è riferita ad un periodo di 40 giorni a partire dall'inizio del rilascio. I risultati dei campi di concentrazione areale sono rappresentati nelle Figure da 3.19 a 3.23, che sono riferite ad alcuni dei giorni simulati. Questa volta il rilascio è continuo nel tempo, per cui si riesce ad individuare facilmente, attraverso l'evoluzione del plume di inquinante, l'andamento medio delle traiettorie seguite dalle particelle inquinate. Il plume procede inizialmente in direzione quasi ortogonale alla costa (Figure 3.19 e 3.20), quando arriva nella zona di influenza delle correnti costiere, devia (Figura 3.21) sino a disporsi parallelamente al litorale (Figura 3.22). Nei giorni successivi al 15°, l'emissione cessa e la macchia d'olio continua a scorrere seguendo il percorso già visto. Il 24° giorno (Figura 3.23) la chiazza è quasi completamente annullata per effetto dello spiaggiamento, che anche in questo caso comincia a rimuovere l'olio a partire dal 6° giorno. Lo spiaggiamento completo dell'olio, che non è ancora evaporato, avviene all'incirca dopo 26 giorni. La zona maggiormente interessata è quella compresa tra Pozzallo e Marina di Modica.

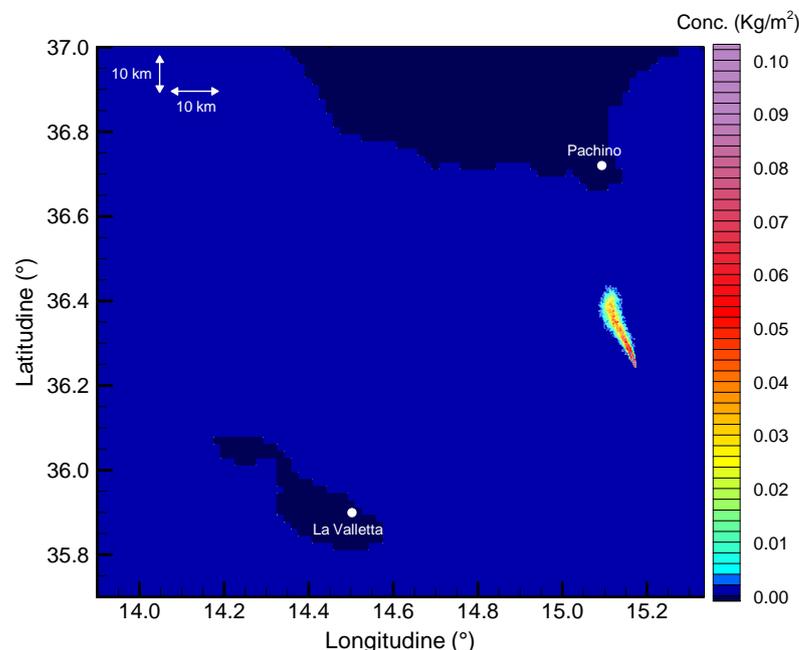


Figura 3.19 – Scenario A3 - Distribuzione spaziale della concentrazione areale di olio calcolata sommando tutta la massa di inquinante contenuta nella colonna d'acqua dopo 2 giorni dall'inizio del rilascio.

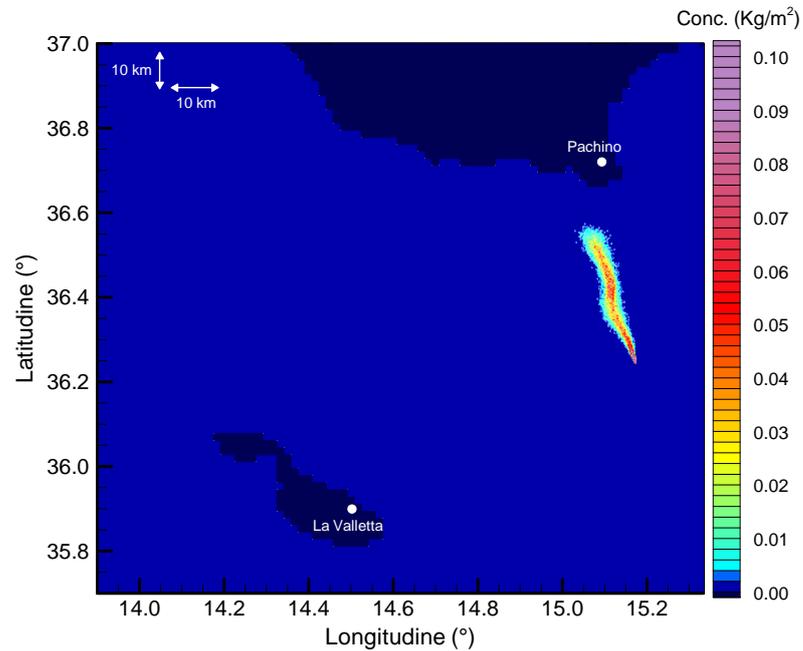


Figura 3.20 – Scenario A3 - Distribuzione spaziale della concentrazione areale di olio calcolata sommando tutta la massa di inquinante contenuta nella colonna d'acqua dopo 4 giorni dall'inizio del rilascio.

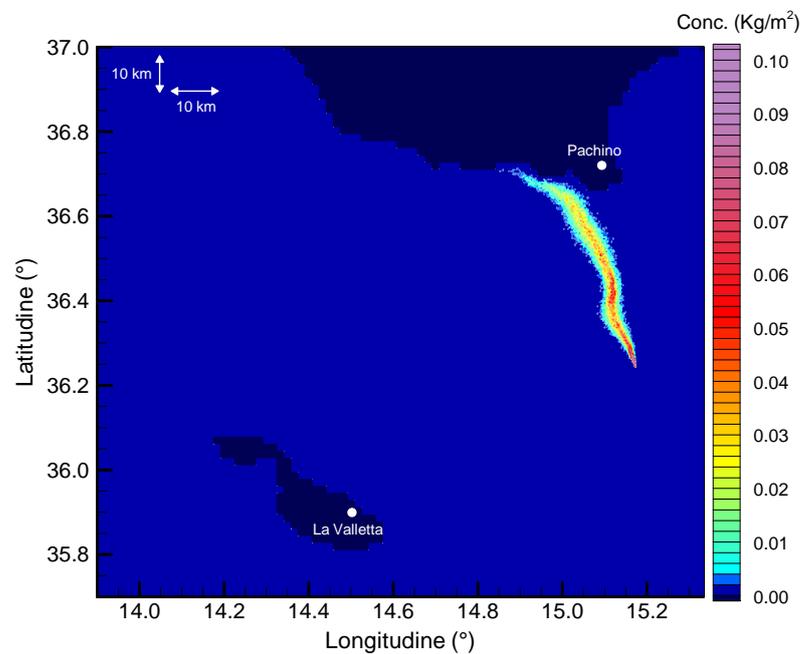


Figura 3.21 – Scenario A3 - Distribuzione spaziale della concentrazione areale di olio calcolata sommando tutta la massa di inquinante contenuta nella colonna d'acqua dopo 6 giorni dall'inizio del rilascio.

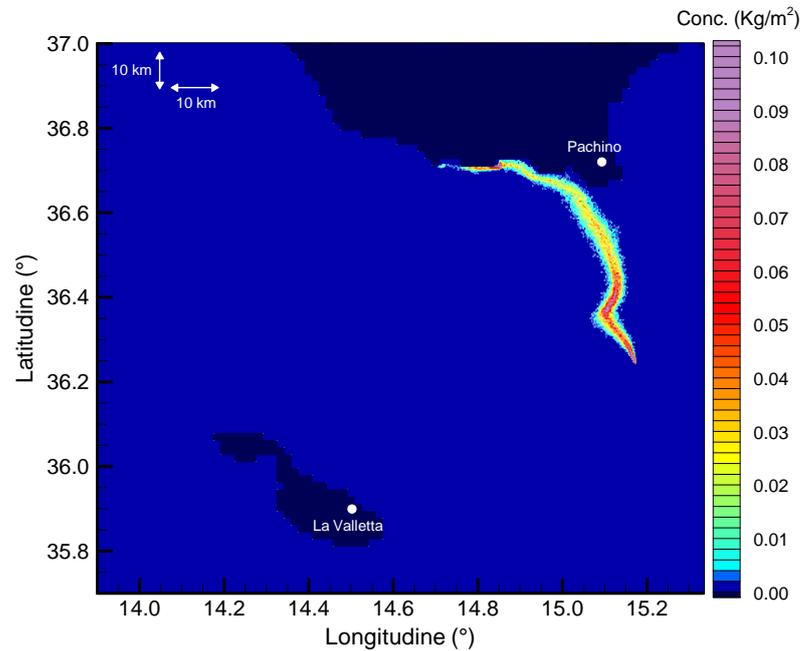


Figura 3.22 – Scenario A3 - Distribuzione spaziale della concentrazione areale di olio calcolata sommando tutta la massa di inquinante contenuta nella colonna d'acqua dopo 15 giorni dall'inizio del rilascio.

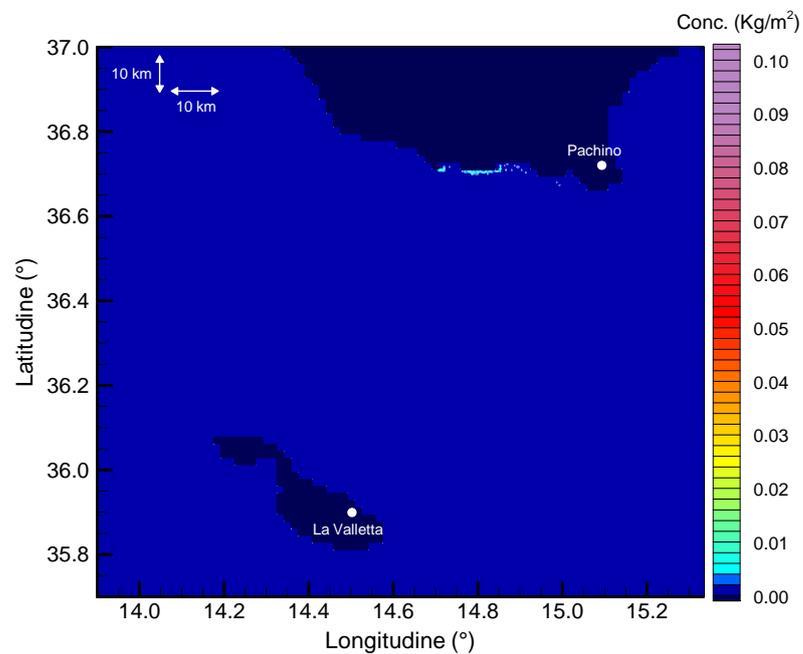


Figura 3.23 – Scenario A3 - Distribuzione spaziale della concentrazione areale di olio calcolata sommando tutta la massa di inquinante contenuta nella colonna d'acqua dopo 24 giorni dall'inizio del rilascio.



3.2.3.1 *Intervento di mitigazione*

Lo scenario previsto nel caso di mitigazione dell'evento di blowout è lo stesso già descritto nei precedenti scenari. I risultati per le concentrazioni areali sono riportati nelle Figure da 3.24 a 3.27. Dopo 2 giorni dall'inizio dell'intervento (Figura 3.24), a meno dello spot corrispondente alla zona di risalita da fondo pozzo, il plume visualizzato è costituito da goccioline di olio con dimensioni al di sotto dei 70 μm , che sono prodotte dalla frazione di onde frangenti. Tali particelle possono rimanere in sospensione per diversi giorni senza risalire in superficie (Delvigne e Sweeney, 1988; Tkalich e Chan 2002). Per effetto della turbolenza comunque alcune particelle di olio risalgono in superficie e vengono periodicamente rimosse dagli skimmer. In Figura 3.25 si osserva la macchia di olio simulata dopo 6 giorni dall'inizio del rilascio, l'olio si trova prevalentemente al di sotto dello strato di rimozione delle barriere. A questa profondità la velocità della corrente è inferiore a quella superficiale e la macchia tende a stazionare per più tempo nella stessa zona, pur subendo comunque gli effetti dispersivi della turbolenza marina. Per effetto della corrente degli strati intermedi, l'olio più profondo viene trasportato verso Sud, mentre le correnti degli strati superiori risentono maggiormente dell'azione di trascinarsi del vento e trasportano la parte rimanente dell'olio verso costa (Figure 3.26 e 3.27).

Se si esclude il picco iniziale, la portata di rimozione complessiva degli skimmer (Figura 3.28) assume un valore costante per tutta la durata del rilascio. L'azione di cattura principale delle barriere si esplica evidentemente in prossimità della zona di risalita del blowout, giustificando l'andamento quasi costante della portata di rimozione. Al cessare dell'emissione dal fondo pozzo le barriere si limitano a rimuovere piccoli quantitativi di goccioline fini che risalgono per effetto della dispersione turbolenta.

Anche in questo scenario analizzato l'intervento di mitigazione riduce di quasi quattro ordini di grandezza la massa di olio spiaggiata. Si passa da circa 9000t a 2t con l'ausilio delle barriere galleggianti (Figura 3.29). Lo spiaggiamento si distribuisce in diverse celle di calcolo, che distano anche alcune decine di km fra loro. Per valutare il livello di inquinamento delle acque dovuto alla presenza delle goccioline di olio disperso, si è calcolata la concentrazione media, intesa come massa di olio disperso per m^3 di acqua. La media è stata calcolata all'interno di ciascuna cella in cui si è suddiviso il dominio di calcolo (vedi paragrafo 3.1). Ogni 6 ore si sono verificate le concentrazioni medie in tutte le celle del dominio tridimensionale e si è determinato il valore massimo. La sequenza temporale dei massimi è riportata in Figura 3.30. Dopo l'intervento di mitigazione i livelli di concentrazione massima sono piuttosto bassi e diminuiscono ulteriormente al cessare del rilascio. L'andamento è irregolare anche a causa del numero di particelle, che essendo molto basso, tende a rendere variabile il valore calcolato per la concentrazione la media. I picchi isolati sono dovuti a episodici accumuli in acque poco profonde in prossimità della costa.

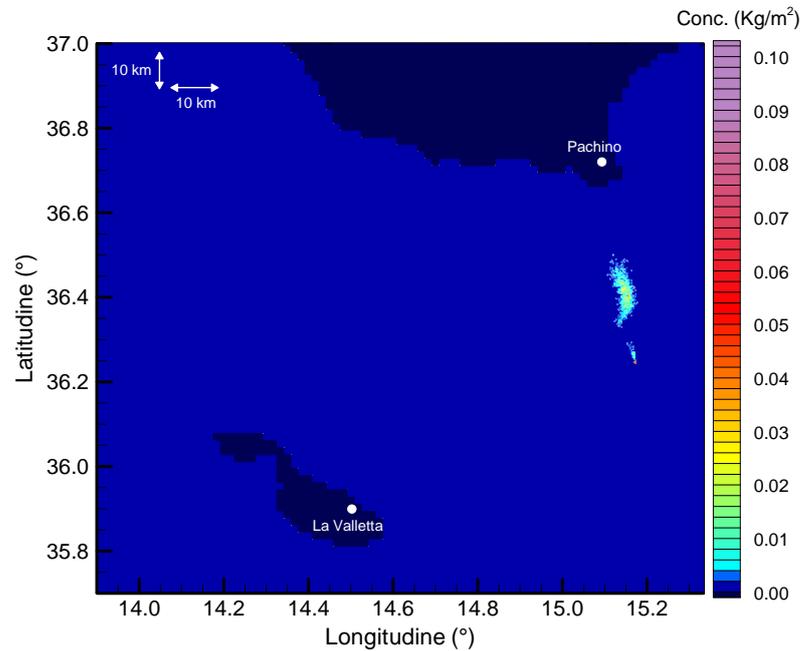


Figura 3.24 – Scenario A3 - Distribuzione spaziale della concentrazione areale di olio calcolata sommando tutta la massa di inquinante contenuta nella colonna d'acqua dopo 4 giorni dall'inizio del rilascio, con intervento di mitigazione.

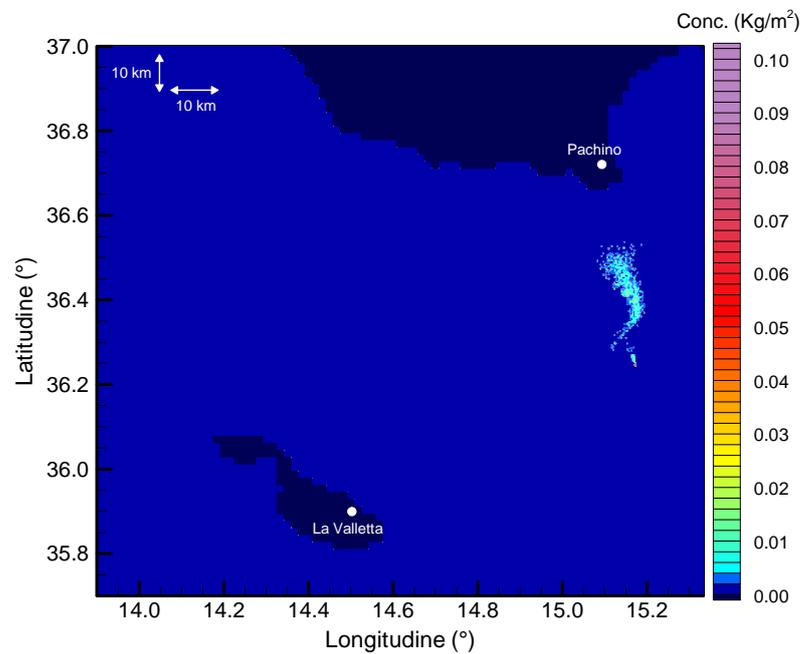


Figura 3.25 – Scenario A3 - Distribuzione spaziale della concentrazione areale di olio calcolata sommando tutta la massa di inquinante contenuta nella colonna d'acqua dopo 6 giorni dall'inizio del rilascio, con intervento di mitigazione.

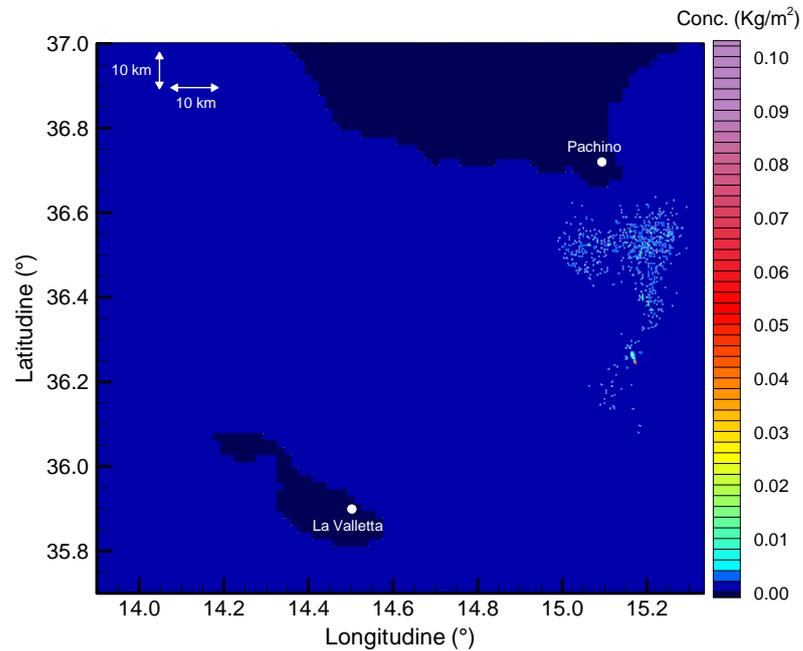


Figura 3.26 – Scenario A3 - Distribuzione spaziale della concentrazione areale di olio calcolata sommando tutta la massa di inquinante contenuta nella colonna d'acqua dopo 15 giorni dall'inizio del rilascio, con intervento di mitigazione.

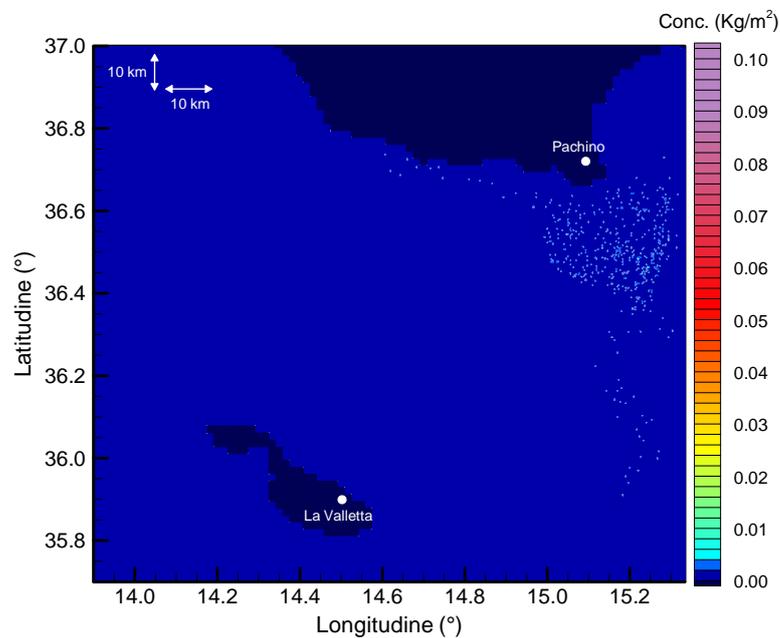


Figura 3.27 – Scenario A3 - Distribuzione spaziale della concentrazione areale di olio calcolata sommando tutta la massa di inquinante contenuta nella colonna d'acqua dopo 24 giorni dall'inizio del rilascio, con intervento di mitigazione.

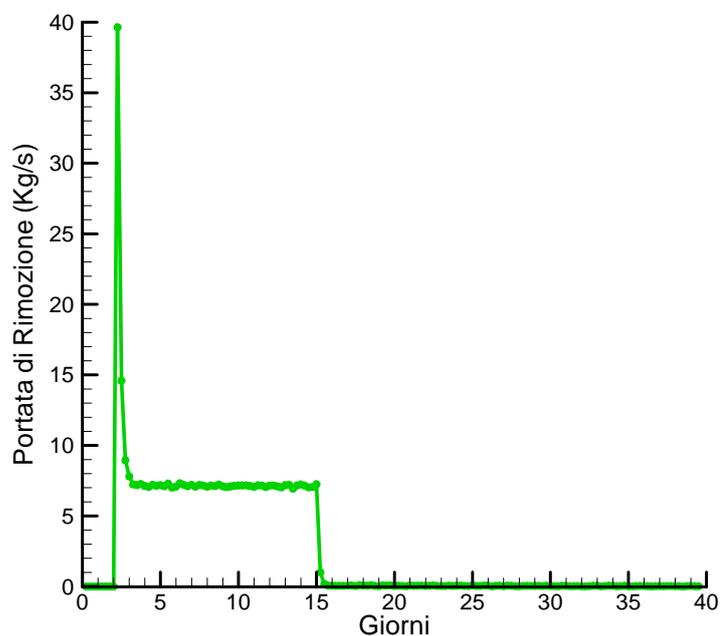


Figura 3.28 – Scenario A3 – Andamento temporale della portata di rimozione dell’olio, ottenibile con le barriere multiple utilizzate nella simulazione.

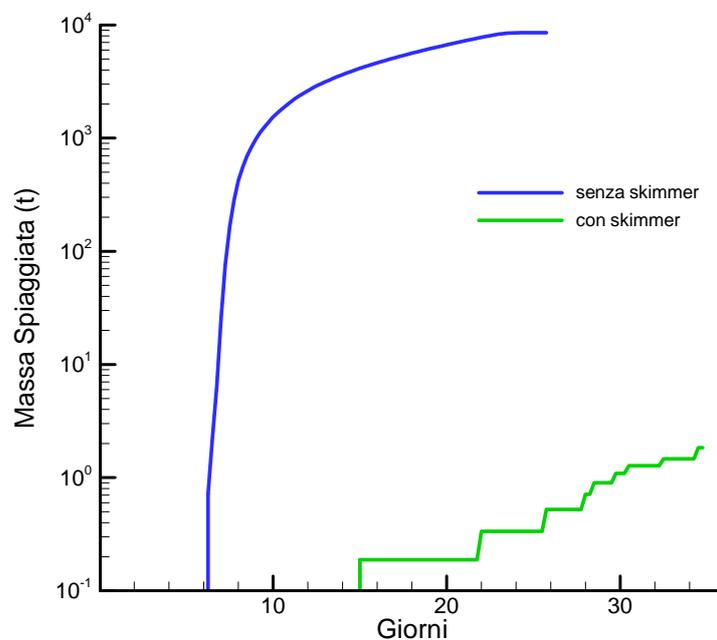


Figura 3.29 – Scenario A3 – Massa di olio spiaggiata durante il periodo simulato. La presenza delle barriere galleggianti con skimmer riduce la massa spiaggiata di quasi 4 ordini di grandezza.

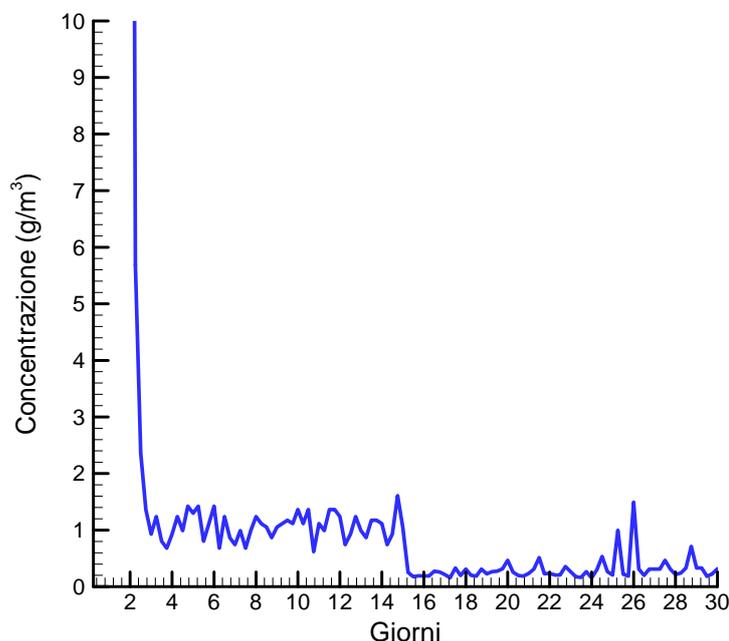


Figura 3.30 – Scenario A3 – Andamento temporale dei valori massimi di concentrazione dell’olio disperso nella colonna d’acqua. I valori sono stati ottenuti a partire dalle concentrazioni medie, calcolate ogni 6 ore in tutte le celle in cui è suddiviso il dominio.

3.2.4 Scenario B1

Lo scenario B1 è riferito al caso della perdita di 5t di gasolio in prossimità della piattaforma di perforazione con vento da NE, favorevole al trasporto verso le coste maltesi. Il rilascio avviene sulla superficie del mare in un tempo di 30 min. La simulazione si protrae per 40 giorni a partire dall’istante del rilascio. Nelle Figure da 3.31 a 3.36 viene rappresentata l’evoluzione della macchia di gasolio durante la simulazione. I campi di concentrazione areale mostrati nei grafici sono calcolati sommando tutta la massa di inquinante contenuta nella colonna d’acqua (dalla superficie sino al fondo) e dividendo per l’area della cella orizzontale.

La macchia si allarga progressivamente, mantenendo una forma pressoché ellittica (Figure da 3.31 a 3.34), dopo 9 giorni arriva in prossimità delle coste maltesi (Figura 3.35), entro il giorno successivo lo spiaggiamento è quasi completo (Figura 3.36). La simulazione cessa esattamente dopo 11.5 giorni, quando tutto il gasolio è spiaggiato. Il tratto di costa complessivamente interessato dallo spiaggiamento si estende da La Valletta sino a quasi tutta la costa nord-occidentale.

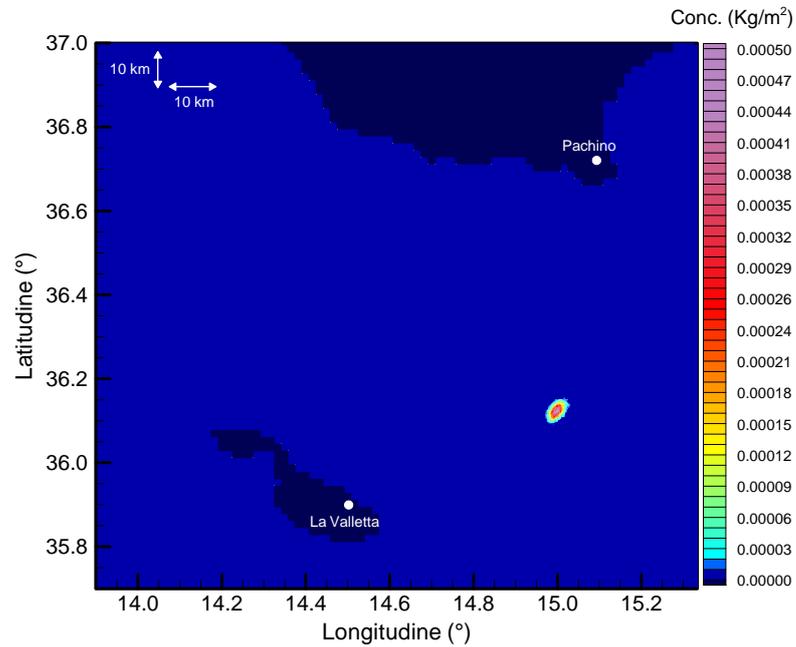


Figura 3.31 – Scenario B1 - Distribuzione spaziale della concentrazione areale di gasolio calcolata sommando tutta la massa di inquinante contenuta nella colonna d'acqua dopo 2 giorni dal rilascio.

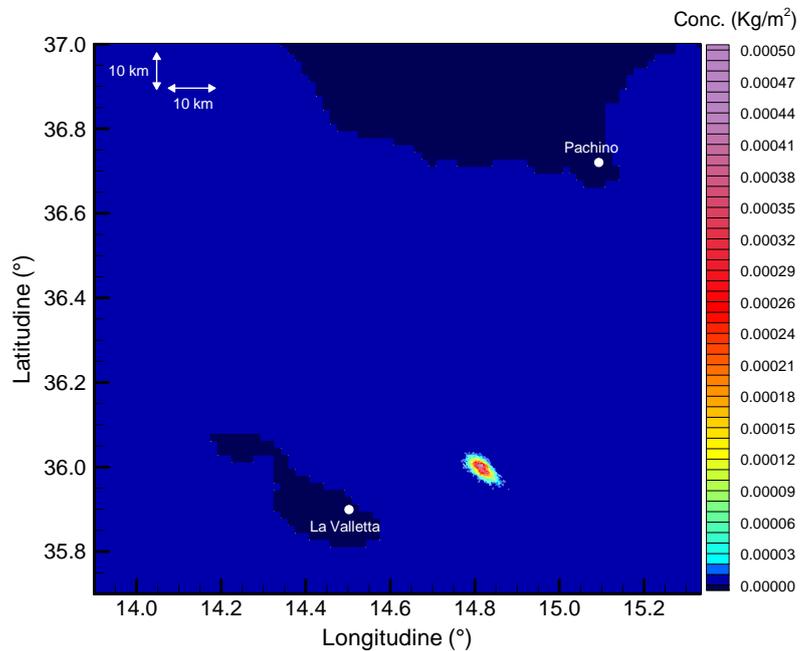


Figura 3.32 – Scenario B1 - Distribuzione spaziale della concentrazione areale di gasolio calcolata sommando tutta la massa di inquinante contenuta nella colonna d'acqua dopo 4 giorni dal rilascio.

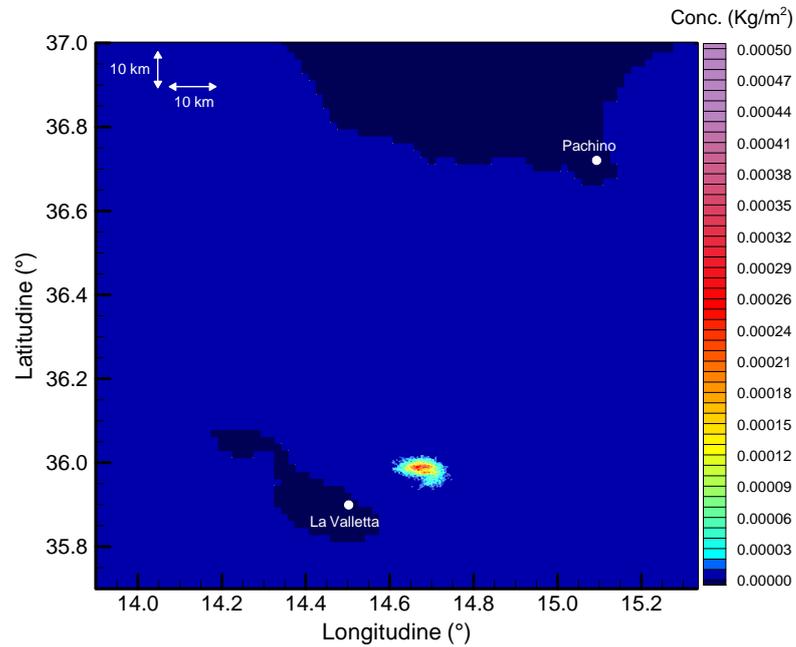


Figura 3.33 – Scenario B1 - Distribuzione spaziale della concentrazione areale di gasolio calcolata sommando tutta la massa di inquinante contenuta nella colonna d'acqua dopo 6 giorni dal rilascio.

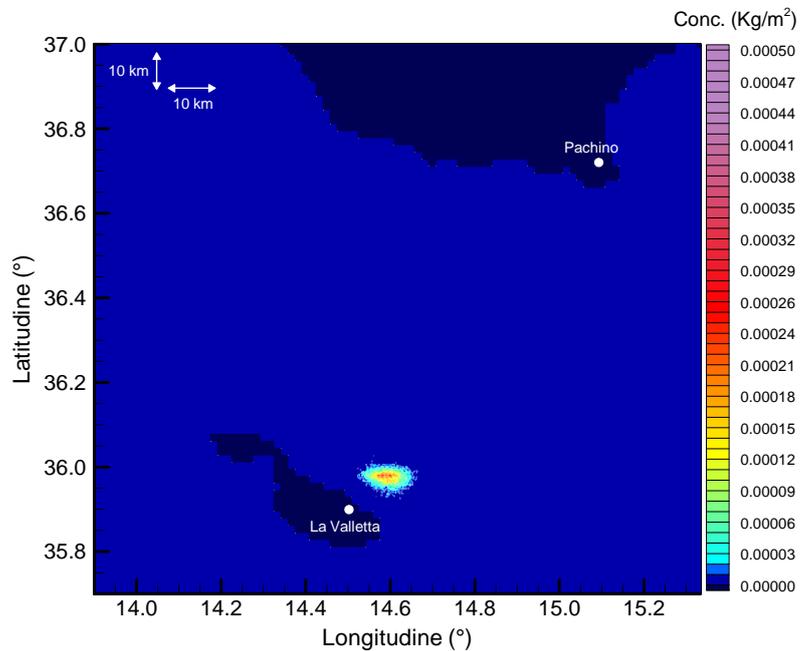


Figura 3.34 – Scenario B1 - Distribuzione spaziale della concentrazione areale di gasolio calcolata sommando tutta la massa di inquinante contenuta nella colonna d'acqua dopo 7 giorni dal rilascio.

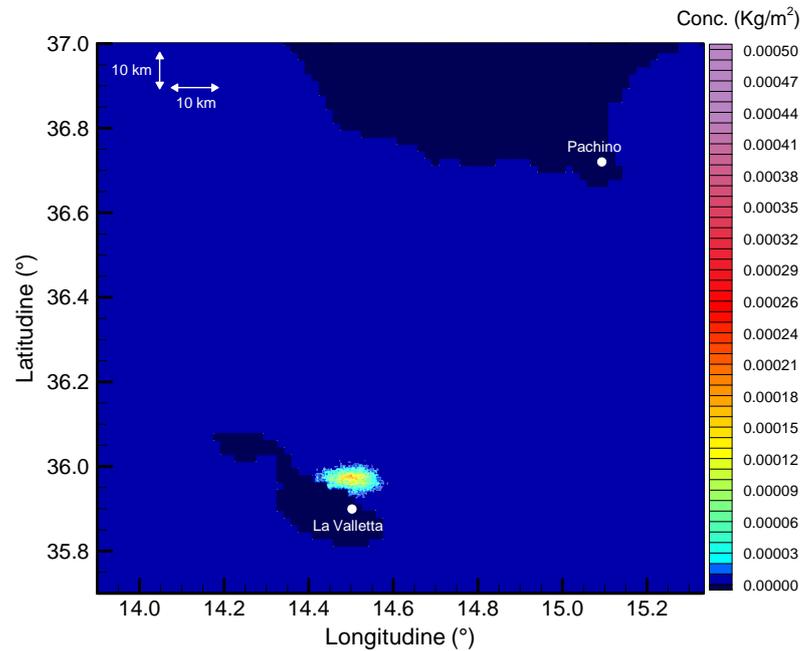


Figura 3.35 – Scenario B1 - Distribuzione spaziale della concentrazione areale di gasolio calcolata sommando tutta la massa di inquinante contenuta nella colonna d'acqua dopo 9 giorni dal rilascio.

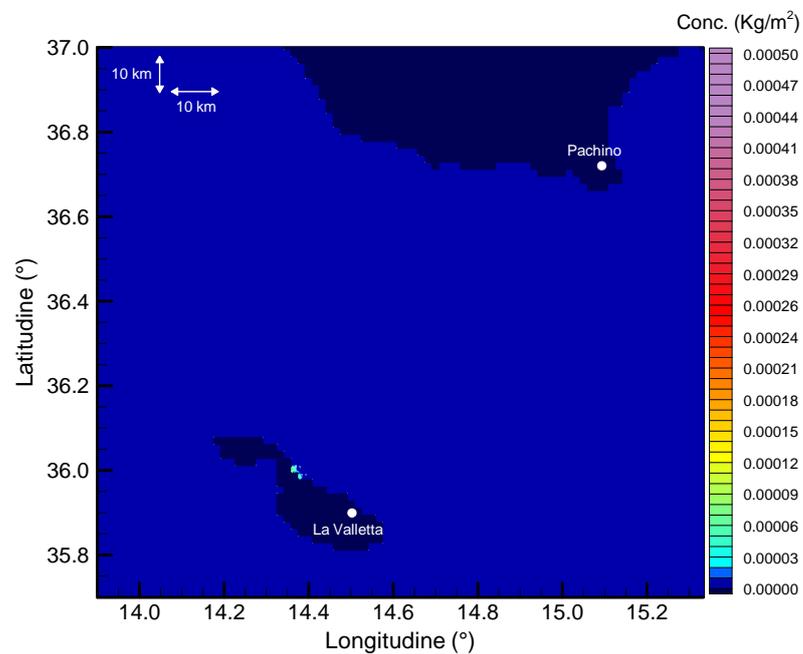


Figura 3.36 – Scenario B1 - Distribuzione spaziale della concentrazione areale di gasolio calcolata sommando tutta la massa di inquinante contenuta nella colonna d'acqua dopo 10 giorni dal rilascio.



3.2.4.1 Intervento di mitigazione

Anche in questo caso si sono analizzati gli effetti prodotti dall'intervento di mitigazione già descritto nei precedenti paragrafi.

Nelle Figure da 3.37 a 3.39 si riportano le mappe di concentrazione ottenute durante l'intervento di mitigazione, nel quarto e settimo giorno. Dal confronto con le figure precedenti, è evidente l'effetto di rimozione dello skimmer, il valore massimo vien ridotto notevolmente (la scala della legenda è stata modificata di un fattore 5 per rendere visibile le mappe di concentrazione). L'azione di rimozione delle barriere rende evidente la dinamica del gasolio residuo al di sotto dello strato di mare superficiale. Man mano che il gasolio si avvicina alla costa di Malta, la chiazza diventa irregolare (Figura 3.38) e tende a lambire la costa orientale (Figura 3.39), da qui, a causa della biforcazione della corrente produce piccoli spiaggiamenti, sia sulla costa settentrionale sia su quella meridionale. Nella Figura 3.40 viene mostrata la portata di rimozione dello skimmer in funzione del tempo. Si osserva un picco della portata all'inizio dell'intervento a cui seguono valori prossimi allo zero non percettibili alla scala del grafico. L'andamento della massa spiaggiata viene riportato a proposito del prossimo scenario, che risulta del tutto simile a quello attuale, a meno di un fattore di scala costante, dovuto alla maggiore portata di emissione.

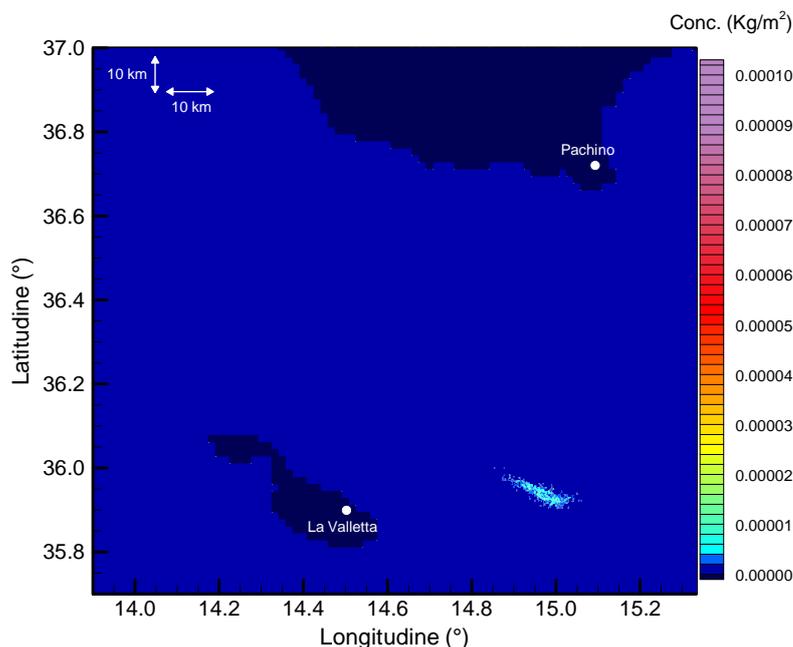


Figura 3.37 – Scenario B1 - Distribuzione spaziale della concentrazione areale di gasolio calcolata sommando tutta la massa di inquinante contenuta nella colonna d'acqua dopo 4 giorni dal rilascio, con intervento di mitigazione.

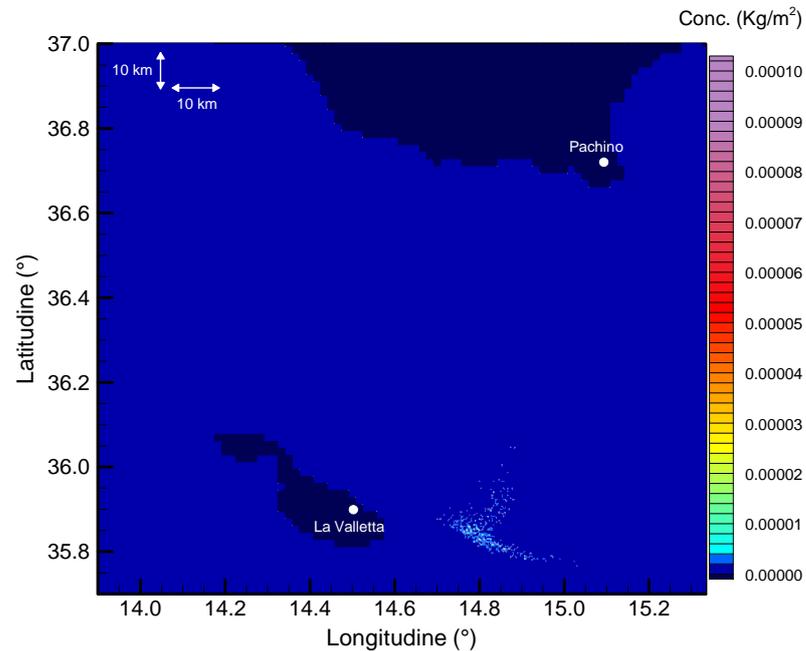


Figura 3.38 – Scenario B1 - Distribuzione spaziale della concentrazione areale di gasolio calcolata sommando tutta la massa di inquinante contenuta nella colonna d'acqua dopo 7 giorni dal rilascio, con intervento di mitigazione.

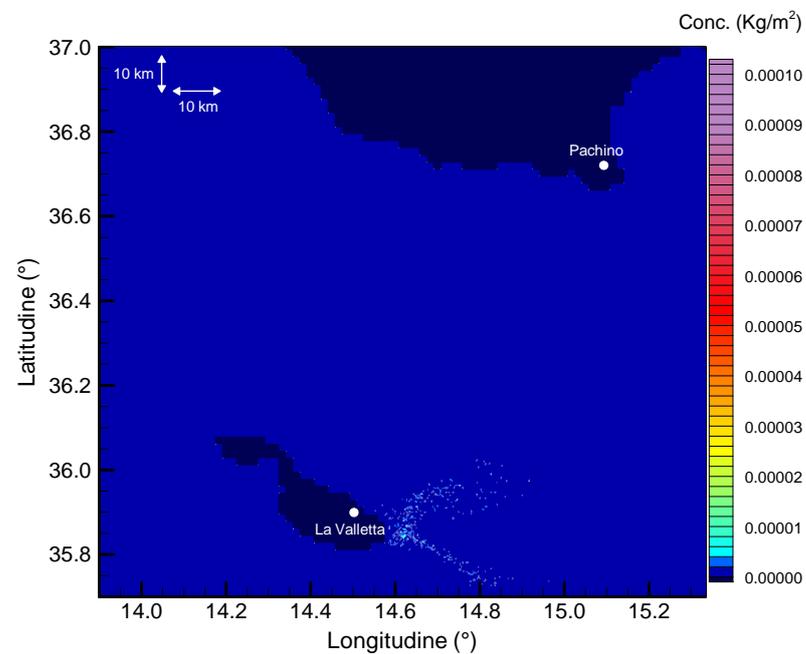


Figura 3.39 – Scenario B1 - Distribuzione spaziale della concentrazione areale di gasolio calcolata sommando tutta la massa di inquinante contenuta nella colonna d'acqua dopo 10 giorni dal rilascio, con intervento di mitigazione.

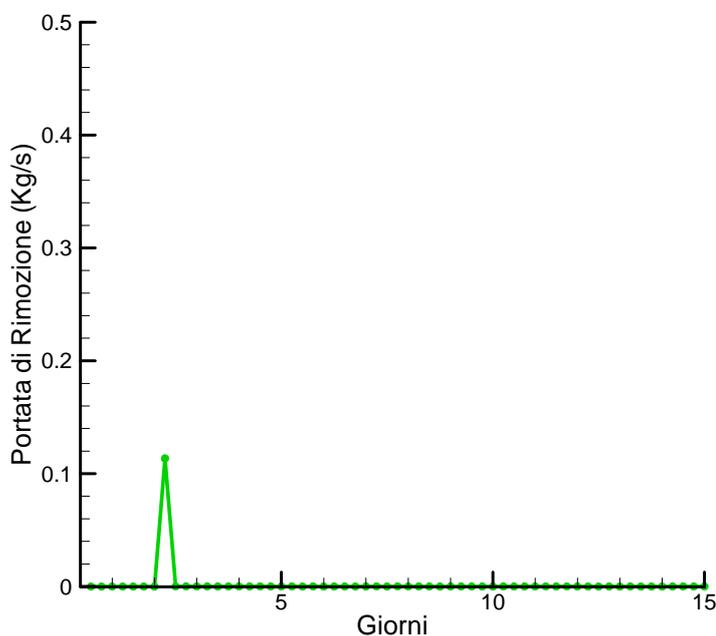


Figura 3.40 – Scenario B1 – Andamento temporale della portata di rimozione del gasolio, ottenibile con la barriera galleggiante utilizzata nella simulazione.

3.2.5 Scenario B2

Nel secondo scenario con vento da NE, si considera un rilascio di 700 t di gasolio in prossimità della piattaforma di perforazione. Anche in questo caso il rilascio avviene sulla superficie del mare in un tempo di 30 min. La simulazione si riferisce ad un periodo di 40 giorni a partire dall'istante del rilascio. L'evoluzione temporale della macchia di gasolio viene rappresentata nelle Figure da 3.41 a 3.46. I campi ottenuti sono simili a quelli dello scenario precedente salvo per il fatto che, in seguito al forte aumento della massa di gasolio rilasciata, la concentrazione è molto più elevata (si può notare che la scala delle concentrazioni nella legenda è stata aumentata di 2 ordini di grandezza). Le considerazioni generali sull'evoluzione della macchia sono analoghe a quelle fatte precedentemente.

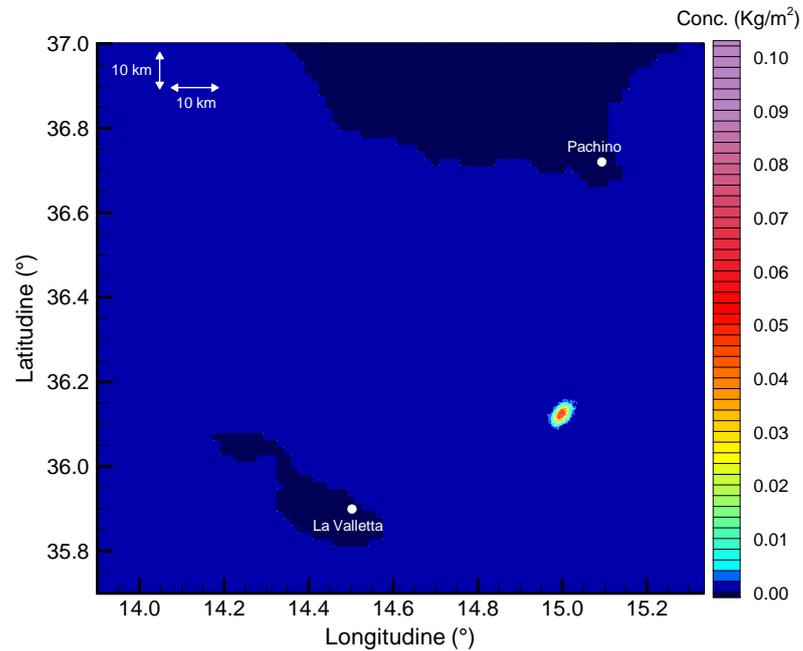


Figura 3.41 – Scenario B2 - Distribuzione spaziale della concentrazione areale di gasolio calcolata sommando tutta la massa di inquinante contenuta nella colonna d'acqua dopo 2 giorni dal rilascio.

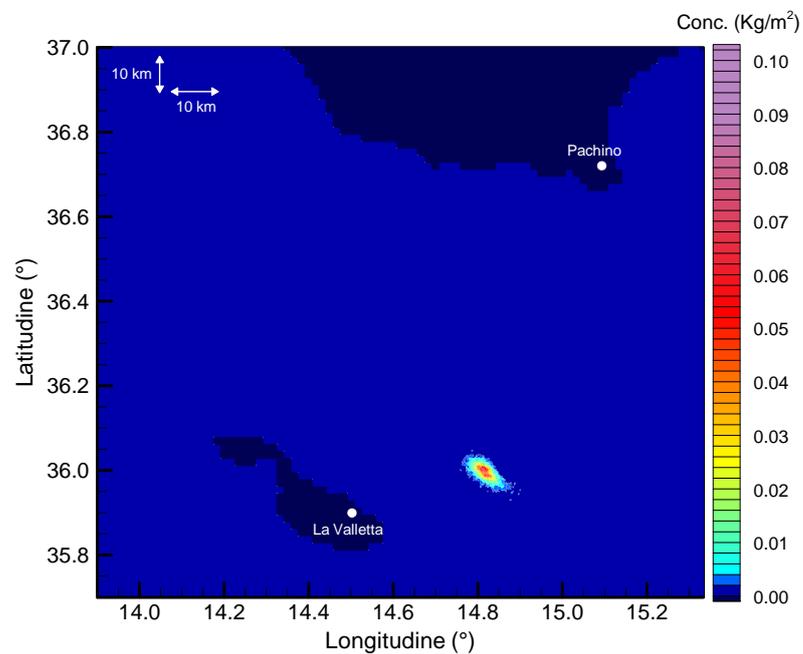


Figura 3.42 – Scenario B2 - Distribuzione spaziale della concentrazione areale di gasolio calcolata sommando tutta la massa di inquinante contenuta nella colonna d'acqua dopo 4 giorni dal rilascio.

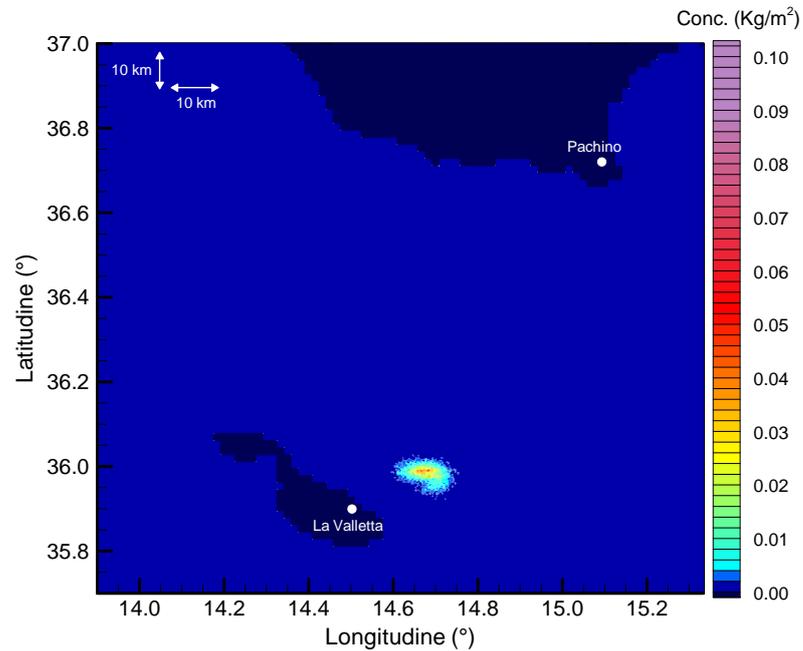


Figura 3.43 – Scenario B2 - Distribuzione spaziale della concentrazione areale di gasolio calcolata sommando tutta la massa di inquinante contenuta nella colonna d'acqua dopo 6 giorni dal rilascio.

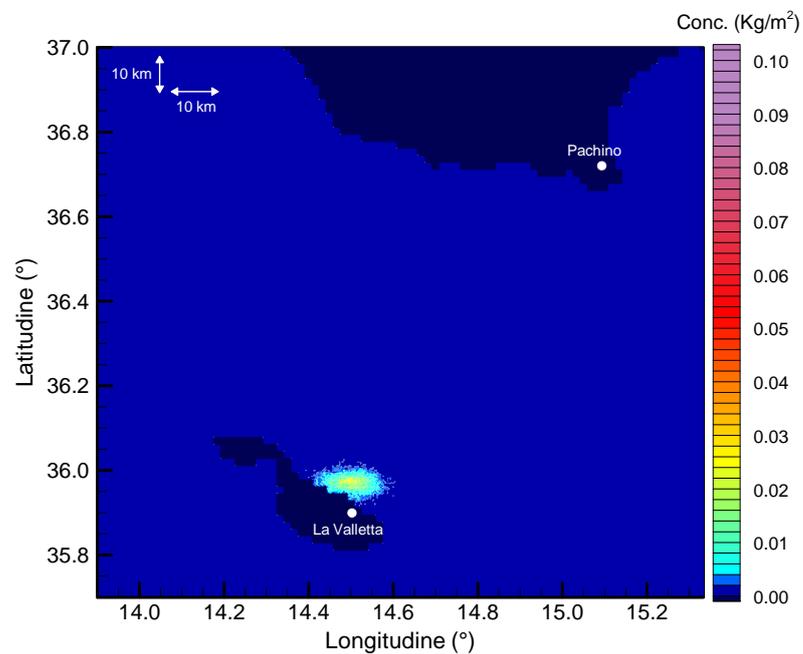


Figura 3.44 – Scenario B2 - Distribuzione spaziale della concentrazione areale di gasolio calcolata sommando tutta la massa di inquinante contenuta nella colonna d'acqua dopo 7 giorni dal rilascio.

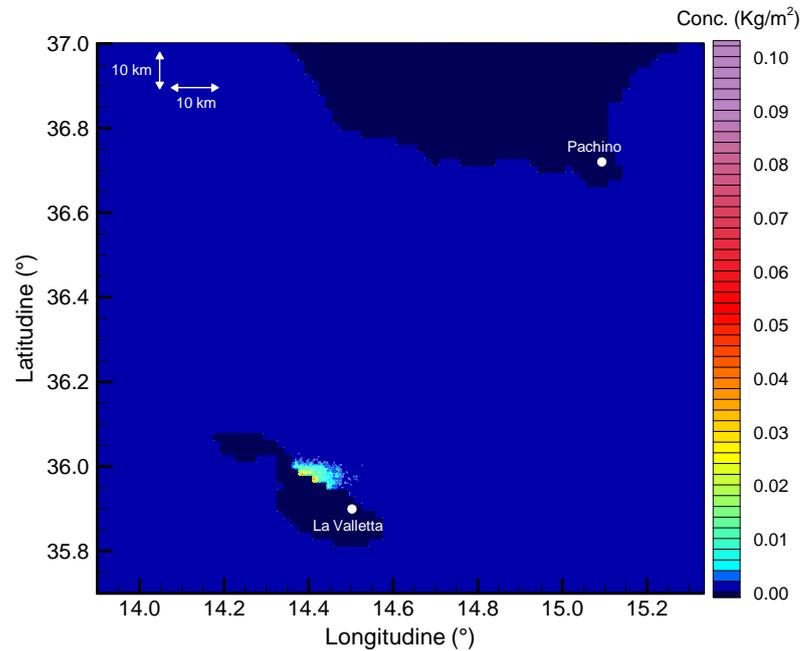


Figura 3.45 – Scenario B2 - Distribuzione spaziale della concentrazione areale di gasolio calcolata sommando tutta la massa di inquinante contenuta nella colonna d'acqua dopo 9 giorni dal rilascio.

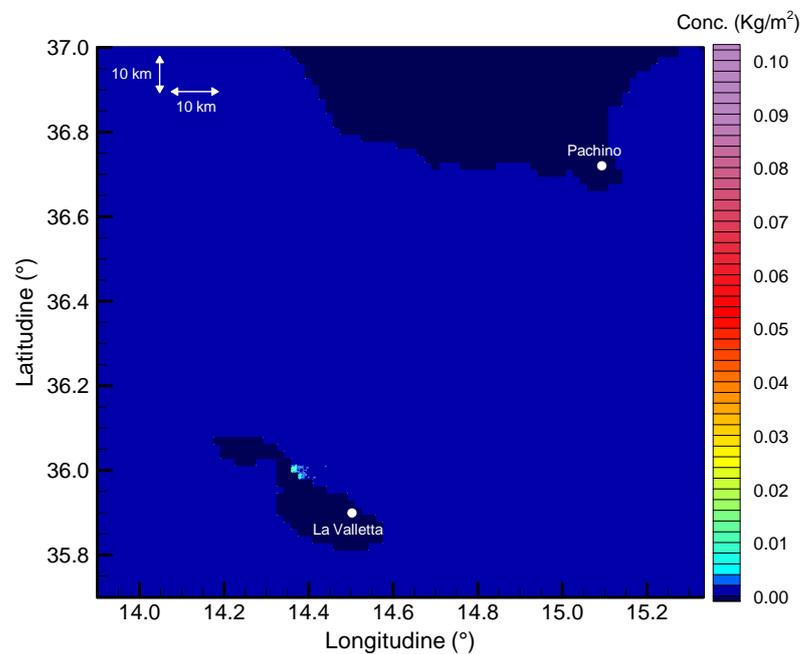


Figura 3.46 – Scenario B2 - Distribuzione spaziale della concentrazione areale di gasolio calcolata sommando tutta la massa di inquinante contenuta nella colonna d'acqua dopo 10 giorni dal rilascio.



3.2.5.1 Intervento di mitigazione

Anche nel caso dell'intervento di mitigazione i risultati sono analoghi allo scenario B1, a meno di un fattore di scala dovuto alla portata. Nelle Figure da 3.47 a 3.49 si riportano le mappe di concentrazione, mentre in Figura 3.50 viene mostrata la portata di rimozione dello skimmer in funzione del tempo. Le considerazioni sono del tutto simili a quelle fatte nel paragrafo 3.2.4.1.

Per caratterizzare quantitativamente lo spiaggiamento sulla costa maltese, viene confrontato l'andamento della massa spiaggiata in assenza ed in presenza dell'intervento di mitigazione (Figura 3.51). Nel primo caso lo spiaggiamento avviene a partire dall'ottavo giorno e dopo circa 4 giorni tutta la massa di gasolio è spiaggiata (l'interruzione della linea del grafico sta ad indicare che la simulazione è interrotta per mancanza di particelle). In presenza di barriere lo spiaggiamento è ridotto di circa 3 ordini di grandezza e inizia a partire dal 12° giorno. Complessivamente si ha meno di 1t di gasolio, distribuito in punti isolati sulla costa nord-occidentale e su quella meridionale.

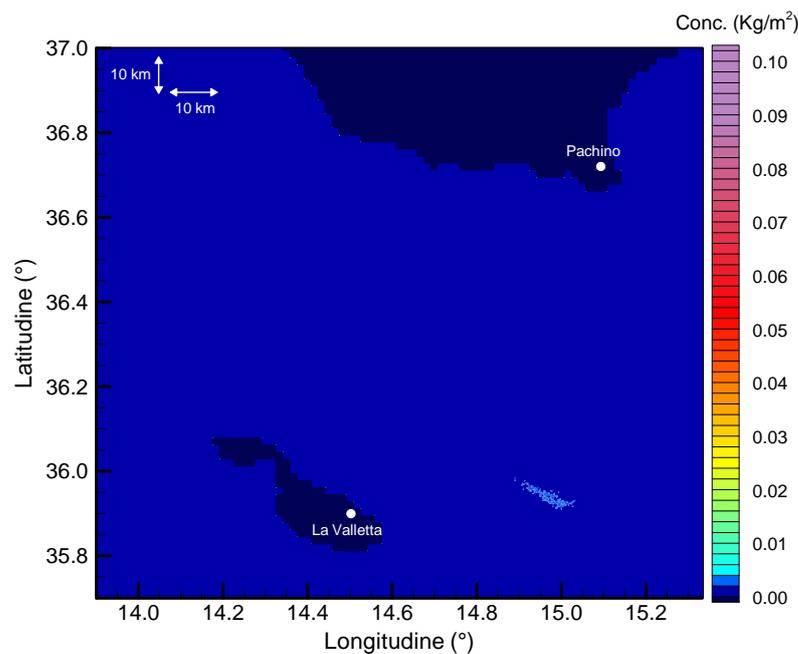


Figura 3.47 – Scenario B2 - Distribuzione spaziale della concentrazione areale di gasolio calcolata sommando tutta la massa di inquinante contenuta nella colonna d'acqua dopo 4 giorni dal rilascio, con intervento di mitigazione.

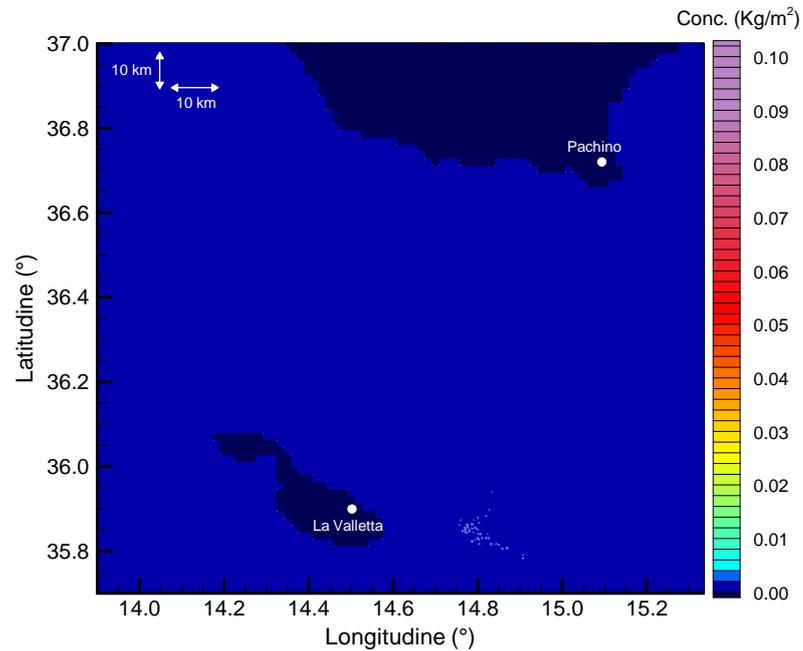


Figura 3.48 – Scenario B2 - Distribuzione spaziale della concentrazione areale di gasolio calcolata sommando tutta la massa di inquinante contenuta nella colonna d'acqua dopo 7 giorni dal rilascio, con intervento di mitigazione.

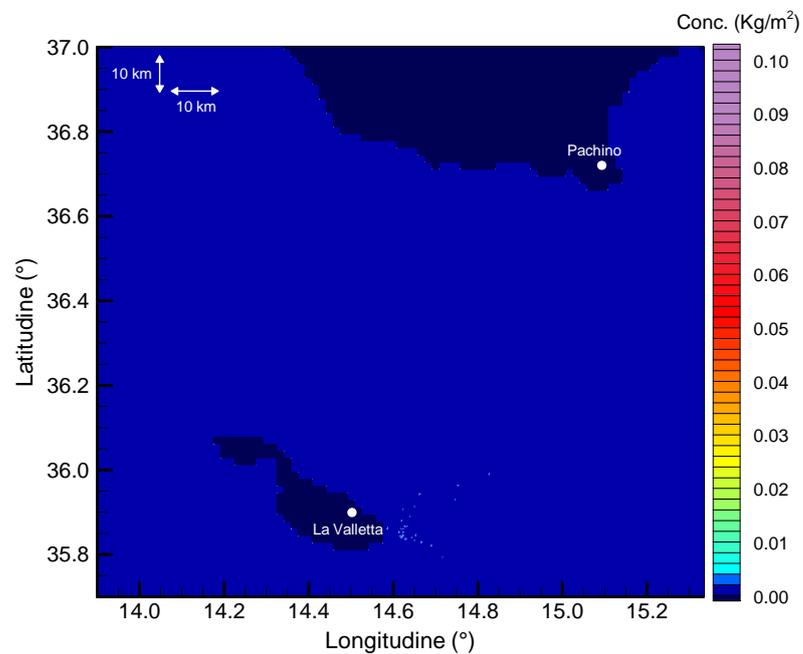


Figura 3.49 – Scenario B2 - Distribuzione spaziale della concentrazione areale di gasolio calcolata sommando tutta la massa di inquinante contenuta nella colonna d'acqua dopo 10 giorni dal rilascio, con intervento di mitigazione.

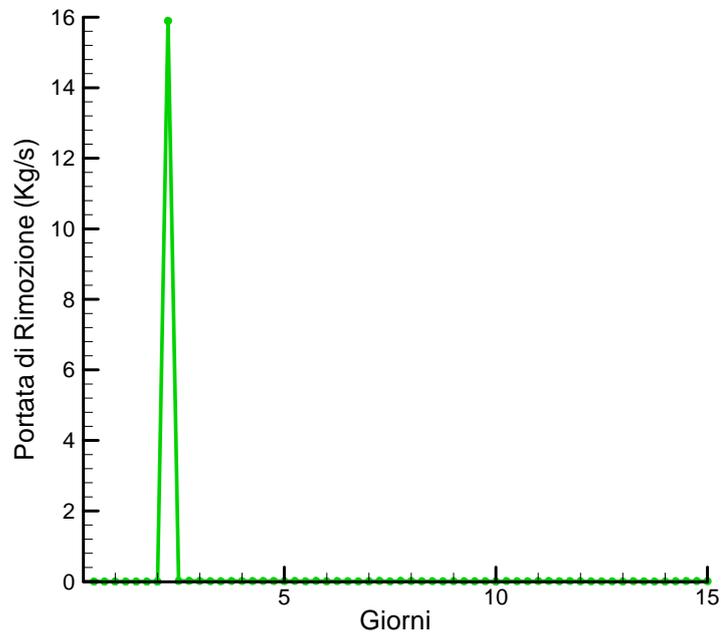


Figura 3.50 – Scenario B2 – Andamento temporale della portata di rimozione del gasolio, ottenibile con la barriera galleggiante utilizzata nella simulazione.

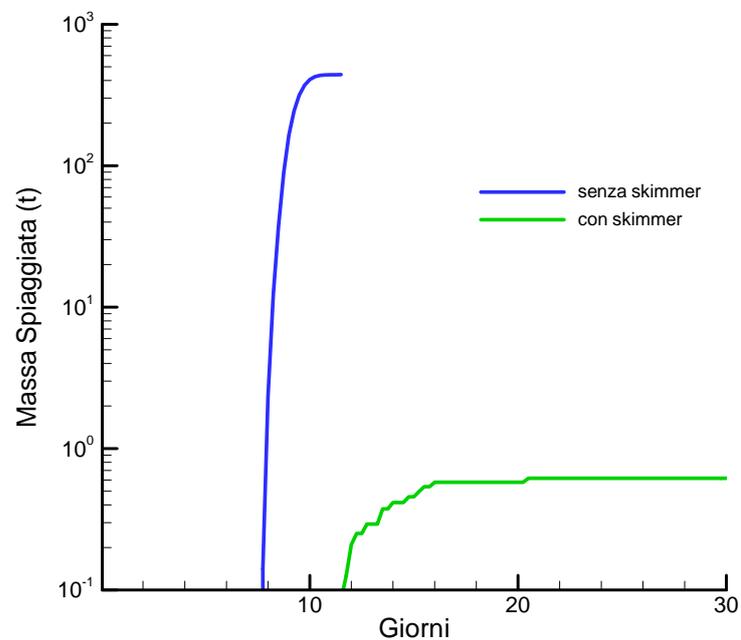


Figura 3.51 – Scenario B2 – Massa di gasolio spiaggiata durante il periodo simulato. La presenza delle barriere galleggianti con skimmer riduce la massa spiaggiata di 3 ordini di grandezza.



3.2.6 Scenario B3

Il terzo scenario con vento da NE si riferisce all'evento di blowout. La simulazione è riferita ad un periodo di 40 giorni a partire dall'inizio del rilascio. I risultati dei campi di concentrazione areale sono rappresentati nelle Figure da 3.52 a 3.56, che sono riferite ad alcuni dei giorni simulati. Seguendo le correnti superficiali (Figura 2.5b) il plume procede inizialmente in direzione SO (Figura 3.52), poi piega in direzione S (Figura 3.53) ed infine si dispone in direzione O (Figura 3.54). Dopo 8 giorni giunge in prossimità della costa maltese e si mantiene in una configurazione quasi stazionaria sino al 15° giorno (Figura 3.55), dando luogo ad un continuo spiaggiamento. Nei giorni successivi al 15°, l'emissione cessa e la macchia d'olio continua a scorrere seguendo il percorso già visto. Il 24° giorno (Figura 3.56) la chiazza è quasi completamente annullata per effetto dello spiaggiamento. Lo spiaggiamento completo dell'olio, che non è ancora evaporato, avviene all'incirca dopo 27 giorni. La zona interessata è tutto il tratto costiero a NO di La Valletta.

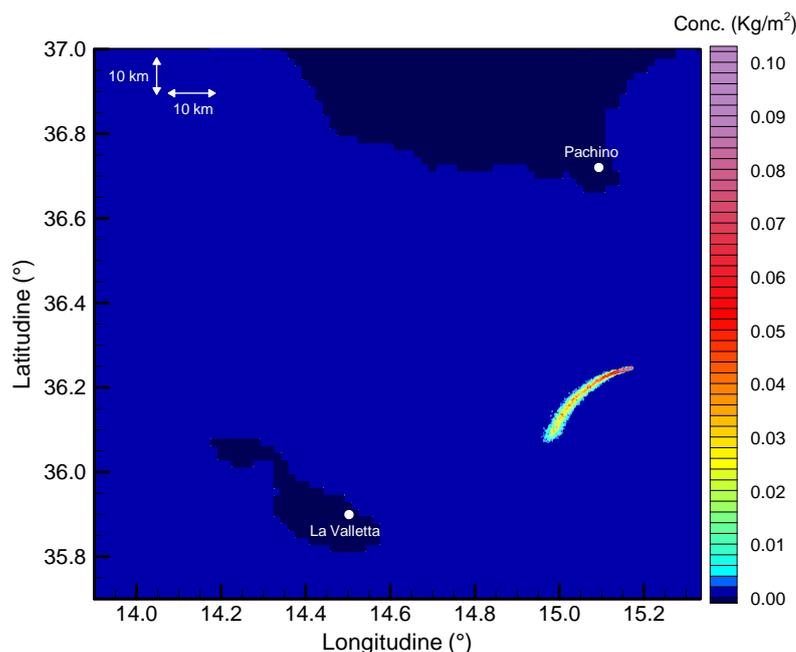


Figura 3.52 – Scenario B3 - Distribuzione spaziale della concentrazione areale di olio calcolata sommando tutta la massa di inquinante contenuta nella colonna d'acqua dopo 2 giorni dall'inizio del rilascio.

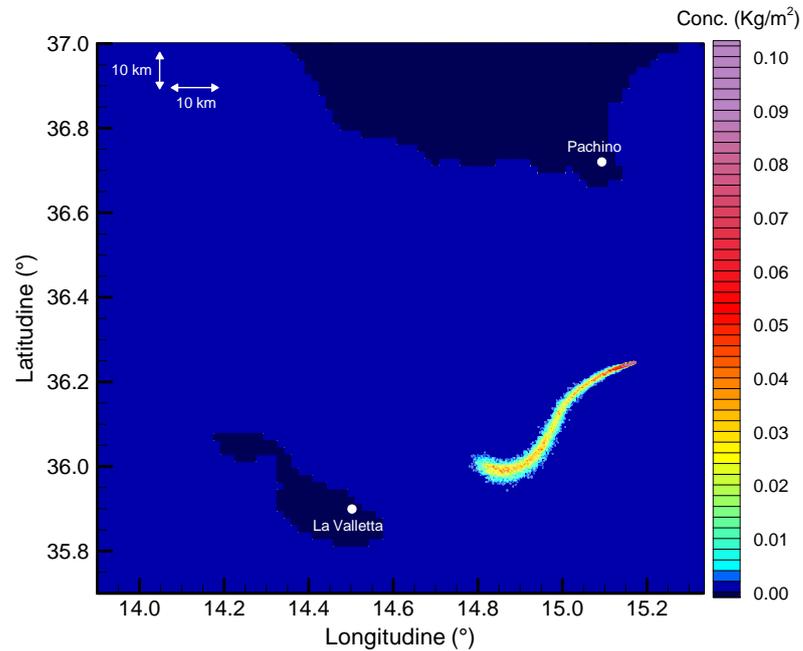


Figura 3.53 – Scenario B3 - Distribuzione spaziale della concentrazione areale di olio calcolata sommando tutta la massa di inquinante contenuta nella colonna d'acqua dopo 4 giorni dall'inizio del rilascio.

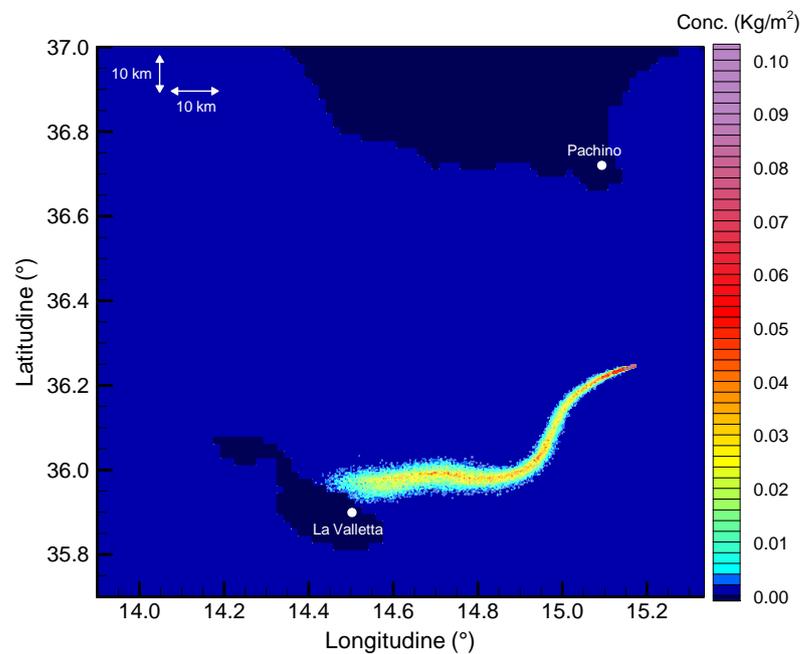


Figura 3.54 – Scenario B3 - Distribuzione spaziale della concentrazione areale di olio calcolata sommando tutta la massa di inquinante contenuta nella colonna d'acqua dopo 8 giorni dall'inizio del rilascio.

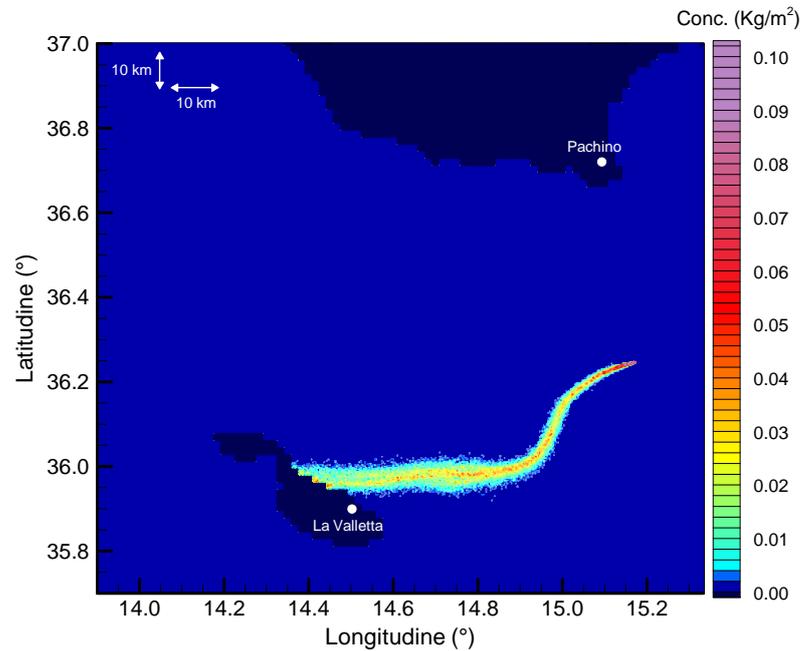


Figura 3.55 – Scenario B3 - Distribuzione spaziale della concentrazione areale di olio calcolata sommando tutta la massa di inquinante contenuta nella colonna d'acqua dopo 15 giorni dall'inizio del rilascio.

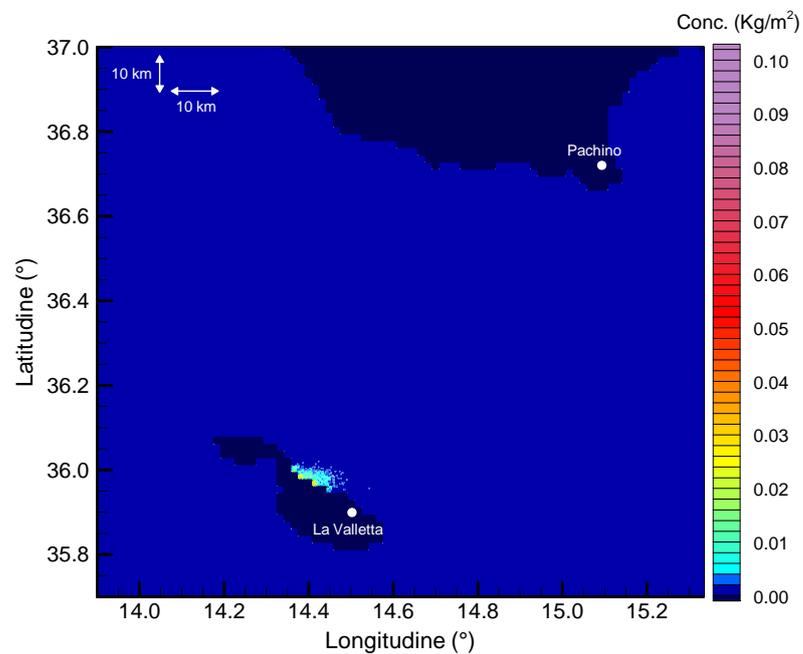


Figura 3.56 – Scenario B3 - Distribuzione spaziale della concentrazione areale di olio calcolata sommando tutta la massa di inquinante contenuta nella colonna d'acqua dopo 24 giorni dall'inizio del rilascio.



3.2.6.1 Intervento di mitigazione

Per ridurre gli effetti del blowout si è utilizzata la tecnica di mitigazione precedentemente descritta. I risultati per le concentrazioni areali sono riportati nelle Figure da 3.57 a 3.60. La macchia costituita dalle goccioline di petrolio mantiene inizialmente una forma relativamente compatta e regolare (Figure 3.57 e 3.58). All'avvicinarsi della zona costiera la macchia si stira, diventa irregolare e tende a circondare parte dell'isola (Figure 3.59 e 3.60).

Per quanto riguarda la portata di rimozione complessiva degli skimmer, anche in questo scenario si ottiene un valore costante per tutta la durata del rilascio, a meno del picco iniziale (Figura 3.61). Al cessare dell'emissione dal fondo pozzo le barriere si limitano a rimuovere piccoli quantitativi di goccioline fini che risalgono per effetto della dispersione turbolenta.

L'intervento di mitigazione riduce di tre ordini di grandezza la massa di olio spiaggiato (Figura 3.62), che passa da circa 9000t a 9t. Lo spiaggiamento si distribuisce lungo le coste dell'isola, con l'esclusione della zona occidentale. I livelli più elevati si verificano sulla costa meridionale.

Per valutare il livello di inquinamento delle acque dovuto alla presenza delle goccioline di olio disperso, si è calcolata la concentrazione media, intesa come massa di olio disperso per m^3 di acqua. La media è stata calcolata all'interno di ciascuna cella in cui si è suddiviso il dominio di calcolo. Ogni 6 ore si sono verificate le concentrazioni medie in tutte le celle del dominio tridimensionale e si è determinato il valore massimo. La sequenza temporale dei massimi è riportata in Figura 3.63. Dopo l'intervento di mitigazione i livelli di concentrazione massima sono piuttosto bassi e diminuiscono ulteriormente al cessare del rilascio.

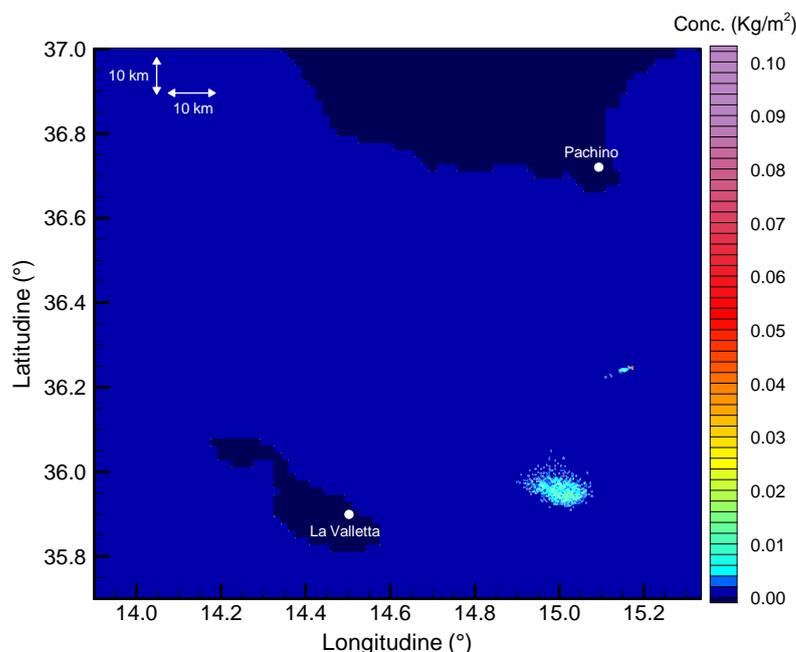


Figura 3.57 – Scenario B3 - Distribuzione spaziale della concentrazione areale di olio calcolata sommando tutta la massa di inquinante contenuta nella colonna d'acqua dopo 4 giorni dall'inizio del rilascio, con intervento di mitigazione.

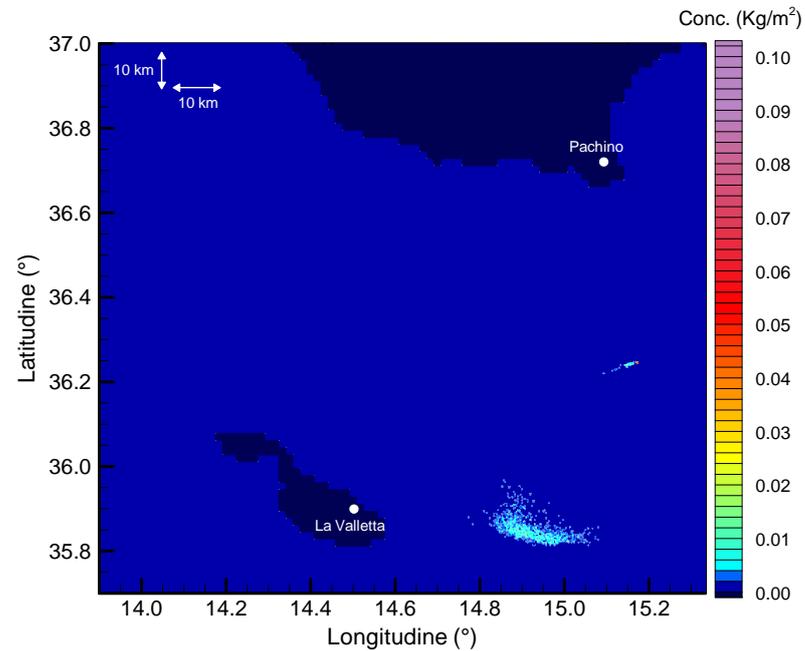


Figura 3.58 – Scenario B3 - Distribuzione spaziale della concentrazione areale di olio calcolata sommando tutta la massa di inquinante contenuta nella colonna d'acqua dopo 6 giorni dall'inizio del rilascio, con intervento di mitigazione.

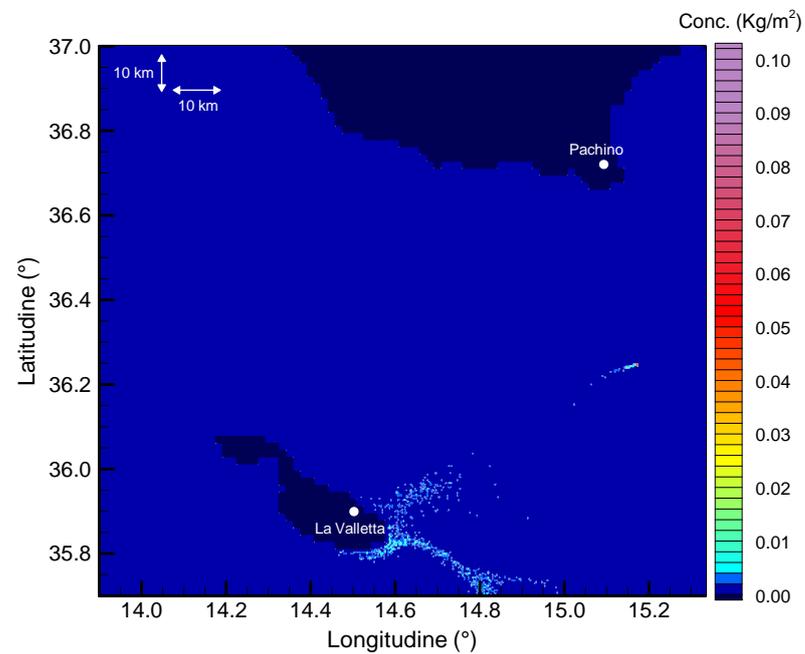


Figura 3.59 – Scenario B3 - Distribuzione spaziale della concentrazione areale di olio calcolata sommando tutta la massa di inquinante contenuta nella colonna d'acqua dopo 11 giorni dall'inizio del rilascio, con intervento di mitigazione mediante barriere multiple.

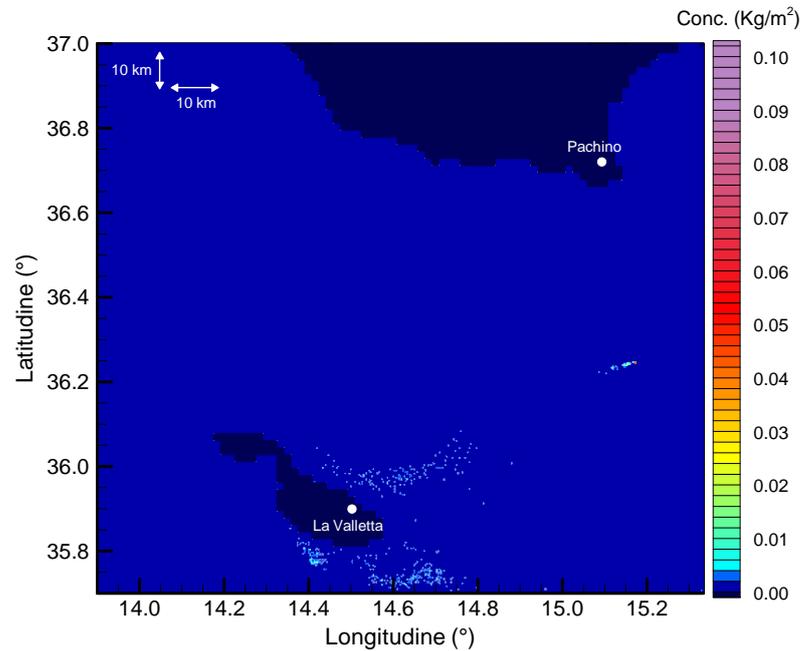


Figura 3.60 – Scenario B3 - Distribuzione spaziale della concentrazione areale di olio calcolata sommando tutta la massa di inquinante contenuta nella colonna d'acqua dopo 15 giorni dall'inizio del rilascio, con intervento di mitigazione.

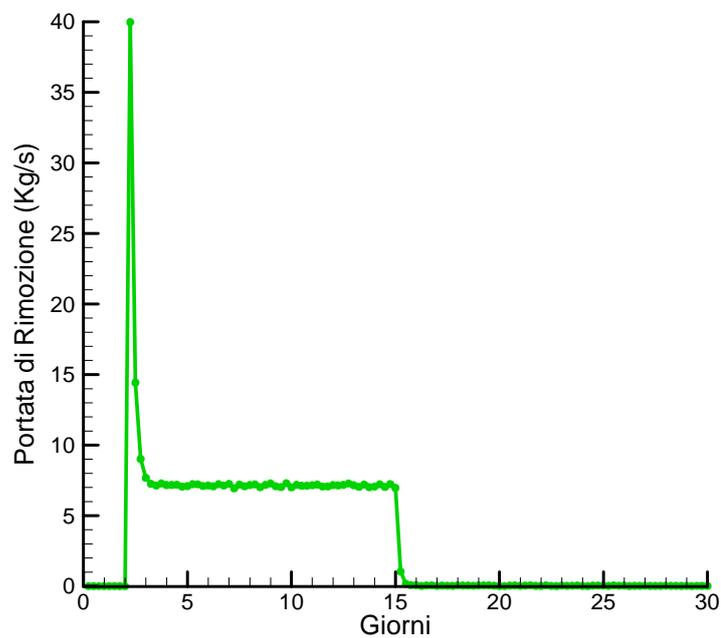


Figura 3.61 – Scenario 3 – Andamento temporale della portata di rimozione dell'olio, ottenibile con le barriere multiple utilizzate nella simulazione.

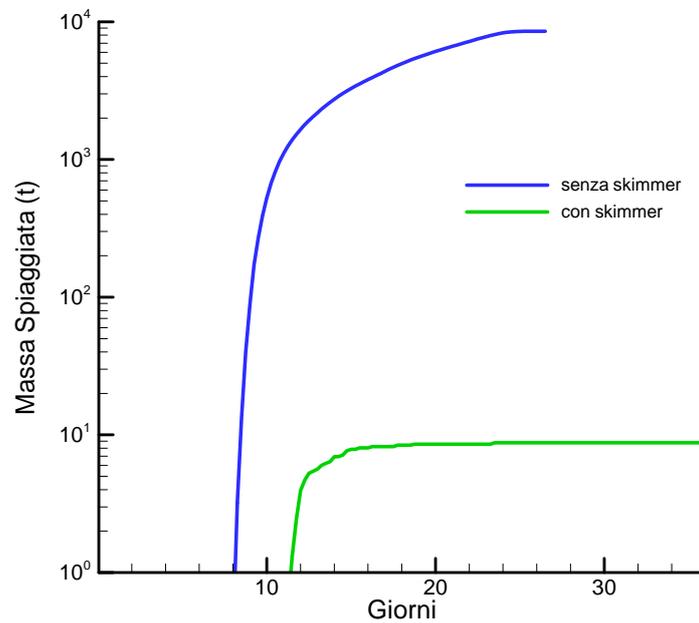


Figura 3.62 – Scenario B3 – Massa di olio spiaggiata durante il periodo simulato. La presenza delle barriere galleggianti con skimmer riduce la massa spiaggiata di 3 ordini di grandezza.

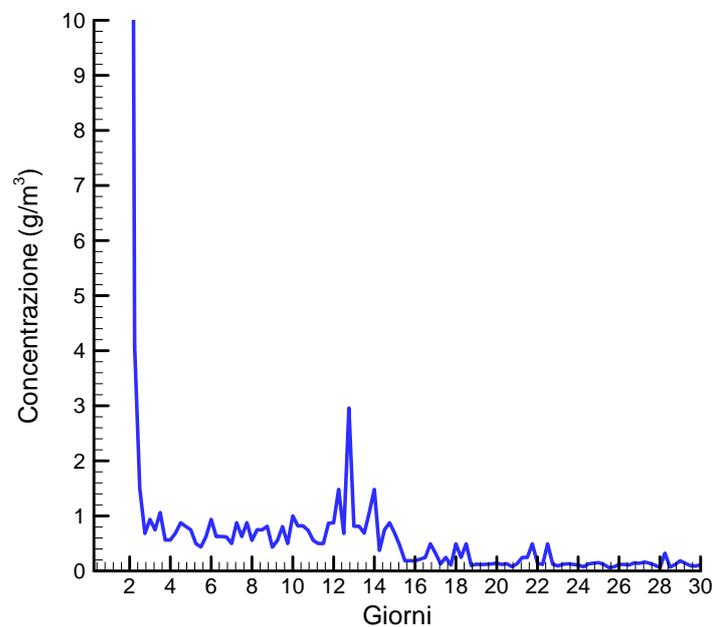


Figura 3.63 – Scenario B3 – Andamento temporale dei valori massimi di concentrazione dell'olio disperso nella colonna d'acqua. I valori sono stati ottenuti a partire dalle concentrazioni medie, calcolate ogni 6 ore in tutte le celle in cui è suddiviso il dominio.



3.2.7 Scenario C1

Gli scenari dei rilasci con vento proveniente da OSO, sono associati a condizioni meteo frequenti nel dominio in esame. Nel caso C1 si considera lo sversamento di 5t di gasolio, secondo le condizioni già riassunte in Tabella 3.1. In Figura 3.64 viene riportata la mappa delle concentrazioni di gasolio dopo 30 ore dal rilascio. Nelle ore successive la macchia di gasolio esce rapidamente dal dominio, dirigendosi verso il mare aperto, oltre il contorno orientale del dominio.

Data la posizione del rilascio nell'ambito della circolazione generale del Mediterraneo, in queste condizioni meteo i venti tendono ad assecondare la corrente di larga scala che tende ad allontanare l'eventuale sversamento dalle terre vicine. I siti di successivo possibile spiaggiamento sono situati a diverse centinaia di chilometri e non potevano quindi essere considerati in uno studio che risolvesse con sufficiente accuratezza le situazione di spiaggiamento critico.

L'intervento di mitigazione, condotto secondo le ipotesi descritte nei paragrafi precedenti, produrrebbe anche in questo la drastica riduzione della massa di gasolio. Tuttavia, per effetto del ritardo nell'applicazione dell'intervento (48 ore), la chiazza di gasolio uscirebbe al di fuori del dominio, rendendo quindi vana l'applicazione della procedura.

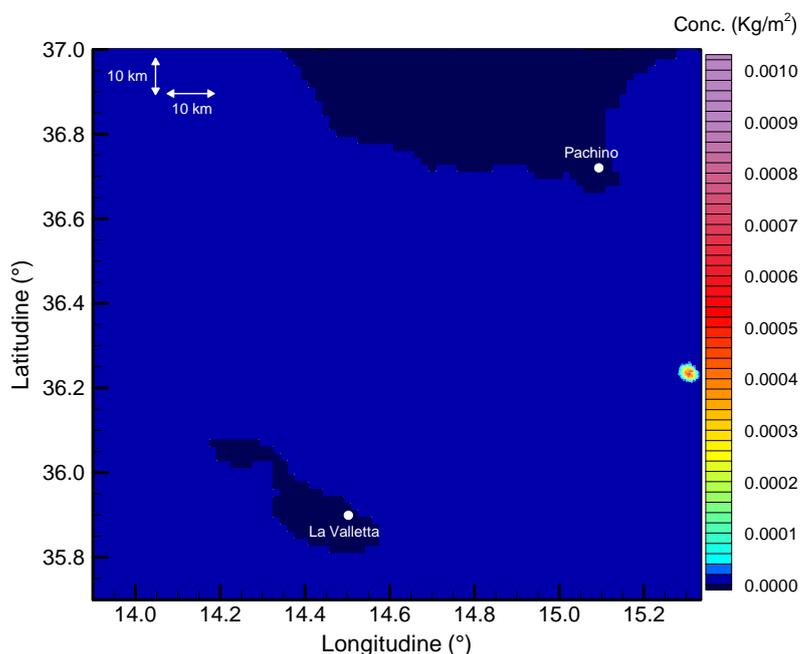


Figura 3.64 – Scenario C2 - Distribuzione spaziale della concentrazione areale di gasolio calcolata sommando tutta la massa di inquinante contenuta nella colonna d'acqua dopo 30 ore dal rilascio.



3.2.8 Scenario C2

Nel secondo scenario con direzione dei venti da OSO, si considera un rilascio di 700t di gasolio in prossimità della piattaforma di perforazione. Il rilascio avviene sulla superficie del mare in un tempo di 30 min. La macchia di gasolio viene rappresentata in Figura 3.65 dopo 30 ore dal rilascio. Nelle ore successive il gasolio esce rapidamente dal dominio di calcolo e valgono quindi le considerazioni già fatte nel paragrafo precedente.

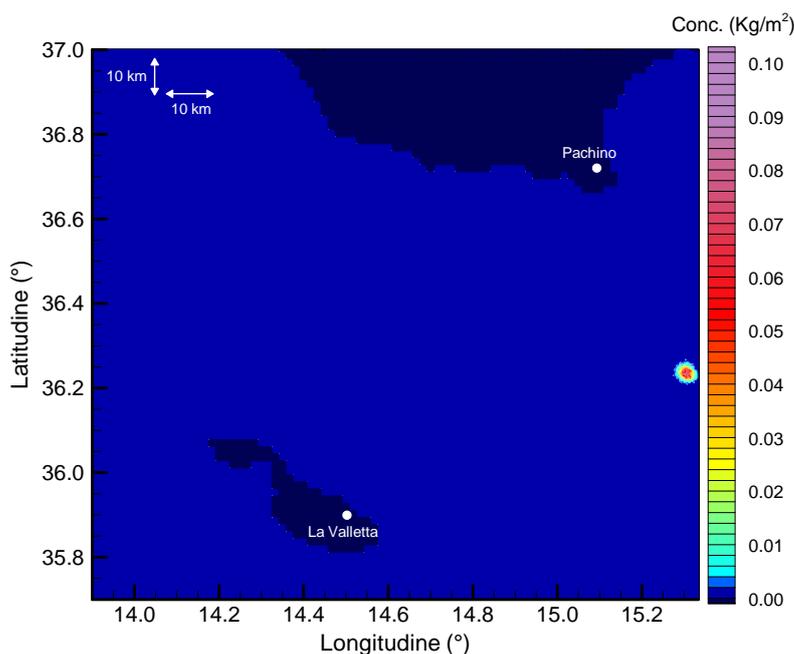


Figura 3.65 – Scenario C2 - Distribuzione spaziale della concentrazione areale di gasolio calcolata sommando tutta la massa di inquinante contenuta nella colonna d'acqua dopo 30 ore dal rilascio

3.2.9 Scenario C3

Lo scenario C3 si riferisce ad un evento di blowout del greggio in concomitanza con venti provenienti dalla direzione OSO, secondo le condizioni in Tabella 3.1. I risultati della simulazione sono riassunti dal campo di concentrazione areale rappresentato nella Figura 3.66, che è riferita al secondo giorno dopo il rilascio. Nei giorni successivi il campo delle concentrazioni resta pressoché invariato sino al 15° giorno, quando cessa il rilascio e l'olio residuo viene trasportato rapidamente fuori dal dominio. Anche in questo caso valgono le considerazioni fatte per lo scenario C1 sul trasporto dell'olio al di fuori del dominio.

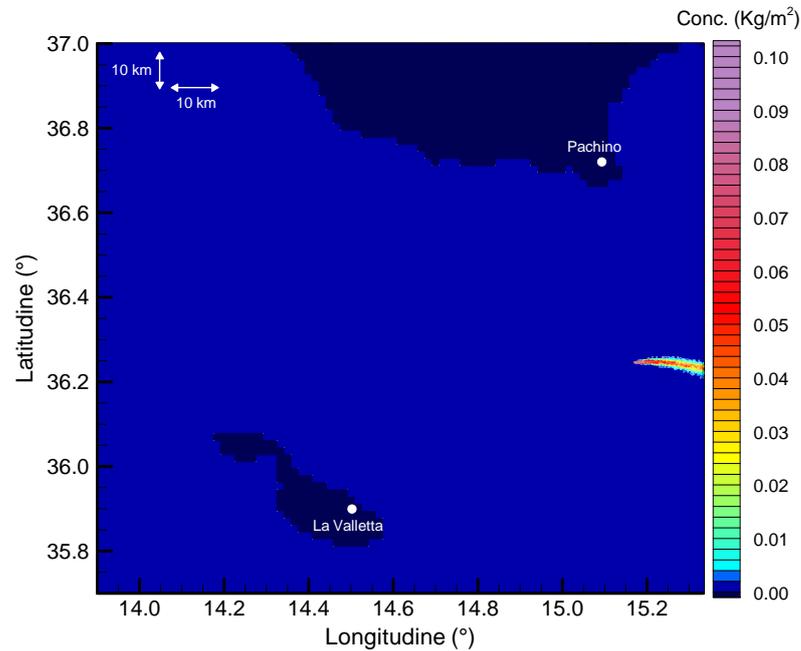


Figura 3.66 – Scenario C3 - Distribuzione spaziale della concentrazione areale di olio calcolata sommando tutta la massa di inquinante contenuta nella colonna d'acqua dopo 2 giorni dall'inizio del rilascio.

3.2.9.1 Intervento di mitigazione

La mitigazione, condotta secondo il metodo già descritto, produce anche in questo caso una forte riduzione della massa di olio all'interno dell'ambiente marino. Il campo di concentrazione ottenuto dopo 1 giorno dall'intervento di mitigazione è rappresentato in Figura 3.67. Risulta appena percettibile lo spot di risalita del plume dal fondo e alcune tracce dell'olio residuo.

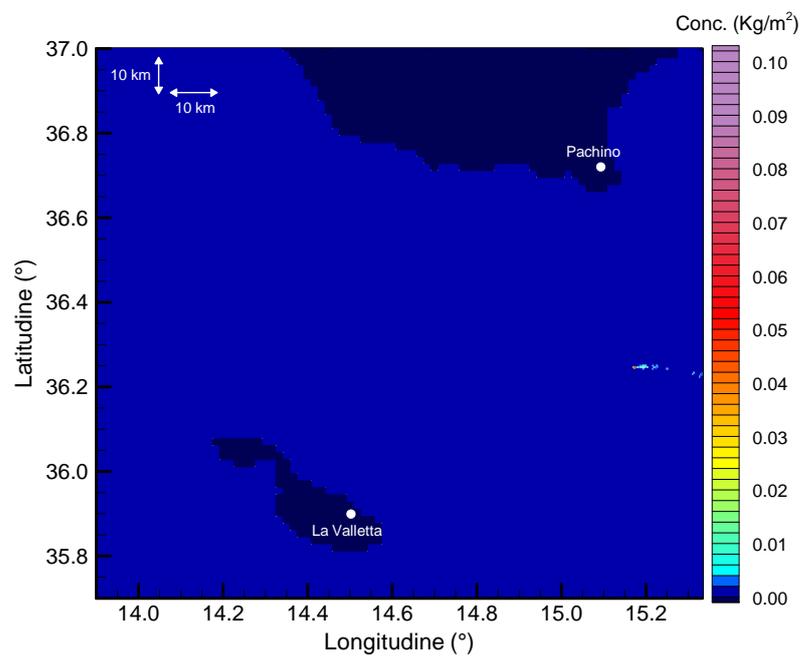


Figura 3.67 – Scenario C3 - Distribuzione spaziale della concentrazione areale di olio calcolata sommando tutta la massa di inquinante contenuta nella colonna d'acqua dopo 3 giorni dall'inizio del rilascio, con intervento di mitigazione.



4 BIBLIOGRAFIA

- Batchelor, G.K., 1954. Heat convection and buoyancy effects in fluids, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 80, 339-358.
- Blumberg, A.F., Mellor, G.L., 1987. A Description of a Three-Dimensional Coastal Ocean Circulation Model. In: Three-Dimensional Coastal Ocean Models. N. Heaps, Ed., 1-16, *American Geophys. Union*.
- De Dominicis, M., Leuzzi, G., Pinardi, N., Poulain, P.-M., 2012. Eddy diffusivity derived from drifter data for dispersion model applications. *Ocean Dynamics*, vol. 62, 1381-1398.
- Delvigne, G.A.L., Sweeney, C.E., 1988. Natural dispersion of oil. *Oil and Chemical Pollution*, 4, 281-310.
- Fay, J., 1971. Physical processes in the spread of oil on a water surface. *American petroleum Institute*, 463-467.
- Fingas, M.F., Fieldhouse, B., 2004. Formation of Water-in-oil Emulsions and Application to Oil Spill Modelling. *Journal of Hazardous Materials*, 107, 37-50.
- Fingas, M.F., Fieldhouse, B., 2005. How to Model Water-in-Oil Emulsion Formation. Proceedings of the 2005 International Oil Spill Conference, *American Petroleum Institute*, Washington, DC.
- Fingas, M.F., 2013. Modeling Oil and Petroleum Evaporation. *Journal of Petroleum Science Research*, 2, 104-115.
- Lehr W.J., Fraga R.J., Belen M.S., Cekirge H.M., 1984. A new technique to estimate initial spill size using a modified Fay-type spreading formula. *Marine Pollution Bulletin*, 326-329.
- Leuzzi, G., Purini, R., 2005. The effect of a promontory on the passive tracer advected by a coastal current: a full three-dimensional study. *Il nuovo Cimento C*, 28, 61-74.
- Monti, P., Leuzzi, G., 2010. Lagrangian models of dispersion in marine environment. *Environmental Fluid Mechanics*, vol.10, 637-656.
- Yapa, P.D., Dasanayaka, L.K., Bandara, U.C., Nakata, K., 2010. A model to simulate the transport and fate of gas and hydrates released in deepwater. *Journal of Hydraulic Research*, 48, 559-572.
- Shen, H.T., Yapa, P.D., 1988. Oil slick transport in rivers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114, 529-543.
- Thomson, D.J., 1987. Criteria for the selection of the stochastic models of particle trajectories in turbulent flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 180, 529-556.
- Tkalich, P., Chan, E.S., 2002. Vertical mixing of oil droplets by breaking waves. *Marine Pollution Bulletin*, 44, 1219-1229.
- Vetrano, A., Gasparini, G.P., Molcard, R., Astraldi, M. 2004. Water flux estimates in the central Mediterranean Sea from an inverse box model. *Journal of Geophysical Research*, 109, C01019.