



**ISPRA**

Istituto Superiore per la Protezione  
e la Ricerca Ambientale

**RILASCIO ACCIDENTALE DI INQUINANTI IN  
PROSSIMITA' DELLO STRETTO DI MESSINA:  
AREE A RISCHIO DEL TIRRENO MERIDIONALE**

*Dr.ssa Annalisa Quattrocioni*

**Tutor: Dr. Roberto Inghilesi**

Data	Firma Stagista	Firma Tutor	Firma Responsabile Servizio

## **Abstract**

Il presente lavoro ha lo scopo di affrontare lo studio della dispersione di prodotti oleosi nella parte meridionale del Mar Tirreno, che rappresenta una delle aree maggiormente soggette al verificarsi di sversamenti di tali prodotti a seguito di collisioni, esplosioni e scarichi lungo le aree costiere, con conseguente impatto sull'intero ecosistema marino.

È stato utilizzato un sistema modellistico accoppiato POM (*Princeton Ocean Model*)-LAWAM (*LAgrangian WAter Model*) in grado di riprodurre la circolazione generale del Mar Tirreno e di simulare la dispersione e il trasporto di un inquinante passivo a bassa densità. Ciò ha permesso di stabilire quali possano essere le aree costiere maggiormente esposte al rischio di contatto da parte di materiale oleoso a seguito di rilascio accidentale in prossimità del Tirreno meridionale.

## **Prefazione**

Il lavoro qui descritto rappresenta una approfondita sperimentazione sui metodi numerico-statistici per determinare il rischio di inquinamento ambientale da oil-spill.

La metodologia proposta abbina lo studio statistico dei regimi meteo-climatici alla simulazione numerica della circolazione marina e delle caratteristiche del trasporto di inquinanti nelle diverse condizioni ambientali associabili a realistiche possibilità di incidente. Il problema di determinare a priori il rischio di contaminazione delle aree marine e costiere associato allo sversamento di sostanze oleose o tossiche in mare è legato alla possibilità di determinare scenari realistici per le condizioni meteo marine sulla scala di bacino e in tale contesto simulare il trasporto degli inquinanti.

L'ISPRA, svolgendo da più di 15 anni il compito di monitorare e prevedere lo stato del mare ed il livello marino, è tra gli Istituti di Ricerca che ha maggiormente contribuito alla conoscenza del clima ondoso e delle condizioni idrologiche lungo le coste italiane. Le attività di simulazione del trasporto di inquinanti in mare si inseriscono naturalmente nelle attività ordinarie di simulazione numerica dell'Istituto, che vertono anche sulla previsione e ricostruzione di episodi di storm-surge o mareggiate aventi significativo impatto sulle coste italiane.

La simulazione della dispersione a costa degli inquinanti marini permette, attraverso lo studio di scenari realistici, di determinare le condizioni di rischio in funzione della posizione, della stagione, delle condizioni di sversamento e naturalmente del tipo di sostanza emessa nelle varie circostanze possibili. Per affrontare il problema è necessario simulare un grande numero di condizioni diverse in modo da riprodurre la variabilità delle possibili condizioni ambientali. Per ottenere dei risultati in grado di riprodurre la gran parte delle caratteristiche dei fenomeni fisici che tipicamente avvengono si opera con complessi modelli numerici in cascata che simulano le diverse fenomenologie: in particolare il sistema delle correnti ed il trasporto e dispersione degli inquinanti. E' necessario lavorare quindi a lungo sulla implementazione dei codici verificando attentamente che il sistema numerico di simulazione sia effettivamente in grado di descrivere lo stato reale del bacino nelle diverse situazioni, confrontando risultati numerici con le caratteristiche attese e controllando l'attendibilità delle condizioni di scenario imposte. Il metodo proposto e' stato proficuamente impiegato nel Mar Tirreno meridionale, dove il traffico di petroliere nelle prossimità dello Stretto di Messina e le severe condizioni meteo-climatiche invernali rendono di primaria importanza la determinazione delle condizioni di rischio ambientale.

## INDICE

<b>INTRODUZIONE.....</b>	<b>5</b>
<b>1 MODELLI NUMERICI</b>	
<b>1.1</b> Caratteristiche del modello POM.....	<b>7</b>
<b>1.2</b> Coordinate sigma.....	<b>8</b>
<b>1.3</b> Caratteristiche del modello LAWAM.....	<b>10</b>
<b>2 ANALISI STATISTICA DEI DATI DI VENTO</b>	
<b>2.1</b> Dati di vento.....	<b>14</b>
<b>2.2</b> Analisi statistica dei dati di vento della stazione di Messina.....	<b>16</b>
<b>2.3</b> Analisi statistica dei dati di vento della stazione di Reggio Calabria.....	<b>19</b>
<b>3 APPLICAZIONE DEL MODELLO POM</b>	
<b>3.1</b> Caratteristiche dell'area in esame.....	<b>23</b>
<b>3.2</b> Implementazione del POM.....	<b>24</b>
<b>3.2.1</b> Batimetria.....	<b>25</b>
<b>3.2.2</b> Dati di temperatura e salinità.....	<b>27</b>
<b>3.2.3</b> Dati di vento.....	<b>28</b>
<b>3.2.4</b> Condizioni al contorno.....	<b>28</b>
<b>3.3</b> Casi studio.....	<b>31</b>
<b>4 VALUTAZIONE DELLA DISPERSIONE DI PETROLIO: APPLICAZIONE DEL MODELLO LAWAM</b>	
<b>4.1</b> Simulazioni di oil spill.....	<b>35</b>
<b>4.2</b> Influenza del vento sulla dispersione.....	<b>36</b>
<b>4.2.1</b> Vento prevalente da nord.....	<b>37</b>
<b>4.2.2</b> Vento prevalente da sud.....	<b>39</b>
<b>4.3</b> Influenza del posizionamento della sorgente.....	<b>40</b>
<b>4.3.1</b> Vento prevalente da nord.....	<b>41</b>
<b>4.3.2</b> Vento prevalente da sud.....	<b>43</b>
<b>4.4</b> Aree a rischio del Tirreno meridionale.....	<b>46</b>
<b>4.4.1</b> Dispersione simultanea di inquinante.....	<b>46</b>
<b>4.4.2</b> Discussione dei risultati.....	<b>49</b>
<b>5 CONCLUSIONI.....</b>	<b>51</b>
<b>Bibliografia.....</b>	<b>54</b>

## INTRODUZIONE

Il forte trasporto marittimo di petrolio greggio e di prodotti di raffinazione rappresenta uno dei principali e più preoccupanti rischi per l'ambiente marino e costiero, sia per il forte rischio di incidenti, con conseguente sversamento di prodotti oleosi e inquinanti in mare, che per inquinamenti derivati dall'attività operativa delle navi, come lo scarico in mare di acque di sentina ed il lavaggio delle cisterne delle petroliere.

Il presente lavoro ha lo scopo di affrontare lo studio della dispersione di prodotti oleosi nella parte meridionale del Mar Tirreno, che rappresenta una delle aree maggiormente soggette al verificarsi di sversamenti di petrolio, dovuti a collisioni, esplosioni e scarichi lungo le aree costiere, con conseguente impatto sull'intero ecosistema marino.

Il primo obiettivo di questo studio è stato quello di riprodurre la circolazione generale del Mar Tirreno, fortemente dipendente dal regime locale dei venti e dalla batimetria del bacino, attraverso un modello numerico tridimensionale.

Successivamente, sulla base dei campi di circolazione ottenuti con il modello idrodinamico, si è simulato il trasporto e la diffusione di un inquinante passivo, con densità minore dell'acqua marina, assimilabile al petrolio, utilizzando un modello di dispersione lagrangiano.

Il modello di circolazione marina utilizzato è il *POM (Princeton Ocean Model, A. F. Blumberg e Mellor, 1987)*, in grado di generare un campo idrodinamico in uscita capace di riprodurre la circolazione generale tipica del Mar Tirreno.

Il *POM* è un modello tridimensionale a superficie libera che risolve numericamente le equazioni di bilancio del moto per un fluido soggetto all'approssimazione di Boussinesq, dotato di coordinate ortogonali curvilinee necessarie per costruire una griglia orizzontale del sito e utilizza un sistema di coordinate verticali di tipo sigma capaci di tener conto della variabilità topografica del fondale marino.

I campi idrodinamici in uscita dal *POM* sono stati utilizzati come dati di input al modello di trasporto e dispersione *LAWAM (LAgrangian WAter Model, G. Leuzzi e P. Monti 2007)*, un modello lagrangiano in grado di descrivere l'andamento temporale delle concentrazioni di inquinante seguendo le traiettorie degli elementi fluidi, indicando la sorgente di emissione e la massa di contaminante disperso.

Prima di utilizzare i due modelli numerici è stata condotta un'analisi statistica dei dati di vento dei mesi invernali relativi al quinquennio 2005-2009 ed appartenenti alla *Rete Mareografica Nazionale (RMN)*, per le stazioni di Messina e Reggio Calabria con lo scopo di stabilire la direzione prevalente del vento per l'intera area in esame. In conclusione di

questa analisi sono stati individuati due periodi invernali della durata di un mese in grado di rappresentare due situazioni di vento tipiche i cui dati sono stati utilizzati come input per il modello di circolazione POM.

Dall'analisi dei risultati ottenuti dalle simulazioni di oil spill, e a seguito della valutazione della dispersione e del trasporto di petrolio per le diverse situazioni esaminate, si è potuto completare il lavoro stabilendo quali possano essere le aree costiere del Tirreno meridionale maggiormente esposte al rischio di contaminazione di prodotti oleosi in caso di sversamenti accidentali nelle diverse condizioni meteorologiche.

L'utilizzo di questi due modelli numerici accoppiati consente di condurre un'indagine preliminare in caso di sversamento accidentale di prodotti oleosi in modo tale da indirizzare gli interventi di mitigazione del danno nelle aree più esposte a rischio.

# 1 MODELLI NUMERICI

## 1.1 Caratteristiche del modello POM

Il POM (*Princeton Ocean Model*) è un modello utilizzato per la simulazione della circolazione marina, ad alta risoluzione spaziale, tridimensionale, a superficie libera, che risolve numericamente le equazioni primitive del moto per un fluido incompressibile con l'approssimazione di Boussinesq, secondo la quale le differenze di densità sono trascurate a meno che non siano moltiplicate per la forza di gravità (Mellor, 2004).

Sviluppato da Blumberg e Mellor negli anni Settanta, inizialmente è stato applicato alla dinamica dei fluidi geofisici od a problemi oceanografici nel programma di scienze atmosferiche ed oceaniche dell'università di Princeton. Successivamente è stato utilizzato in tantissimi casi a livello mondiale: ad esempio per determinare la circolazione nell'Oceano Atlantico, nel golfo del Messico, nel Mediterraneo, nell'Adriatico.

Il POM utilizza coordinate ortogonali curvilinee, che permettono di realizzare una griglia orizzontale del sito considerato e coordinate verticali di tipo sigma, che tengono conto della variabilità topografica che si riscontra nel fondale marino. Per la chiusura delle equazioni del moto viene utilizzato uno schema unidimensionale con due equazioni, noto in letteratura come “*modello di chiusura della turbolenza di Mellor-Yamada*”, che permette di fornire una parametrizzazione realistica dei processi di mescolamento verticale.

La risoluzione numerica di tutte le equazioni, sia del moto del fluido che della turbolenza, fornisce le tre componenti della velocità ( $u$ ,  $v$ ,  $w$ ), la temperatura ( $T$ ), la salinità ( $S$ ), l'energia cinetica turbolenta ( $q^2$ ) ed il prodotto tra l'energia cinetica turbolenta e la lunghezza di scala turbolenta ( $q^2 l$ ).

Le variabili relative alla turbolenza, insieme con il gradiente di velocità verticale e la forza di galleggiamento, sono utilizzate per determinare i coefficienti di mescolamento turbolento verticale; i coefficienti orizzontali di viscosità vorticosa (*eddy viscosity*), detti anche di diffusione orizzontale, sono calcolati attraverso la formula di Smagorinsky.

Un'altra importante caratteristica del POM è quella di adottare la cosiddetta tecnica del “*mode splitting*”, cioè permettere di separare il calcolo dell'elevazione della superficie del mare (*external mode* o barotropico), soggetta agli sforzi del vento, dal calcolo delle componenti della velocità tridimensionale e della termodinamica del fluido (*internal mode* o baroclinico). Naturalmente in questa tecnica di calcolo separato vengono utilizzati tempi

diversi (*time step* o  $\Delta t$ ), che risultano essere rispettivamente corto e lungo ma comunque entrambi basati sulle condizioni di stabilità numerica di Courant.

Il codice è scritto in linguaggio FORTRAN ed è caratterizzato da varie subroutine che racchiudono i comandi per applicare al sito considerato, dopo la formazione di una griglia orizzontale, il calcolo della densità, della temperatura, la formazione della batimetria, l'applicazione degli sforzi del vento.

Il POM è largamente utilizzato dalla comunità scientifica e negli anni è stato soggetto a revisioni, aggiornamenti e piccole modifiche per renderlo applicabile in ogni possibile situazione (Mellor, 2004).

## 1.2 Coordinate sigma

Il sistema di coordinate cartesiane  $x, y, z$  presenta degli svantaggi nelle vicinanze di grandi irregolarità batimetriche e proprio per questo motivo si introduce un nuovo sistema di variabili indipendenti che permettono di riscrivere le equazioni in coordinate sigma o “*bottom following*” basate sulla seguente trasformazione:

$$x^* = x \quad (1)$$

$$y^* = y \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{z - \eta}{H + \eta} \quad (3)$$

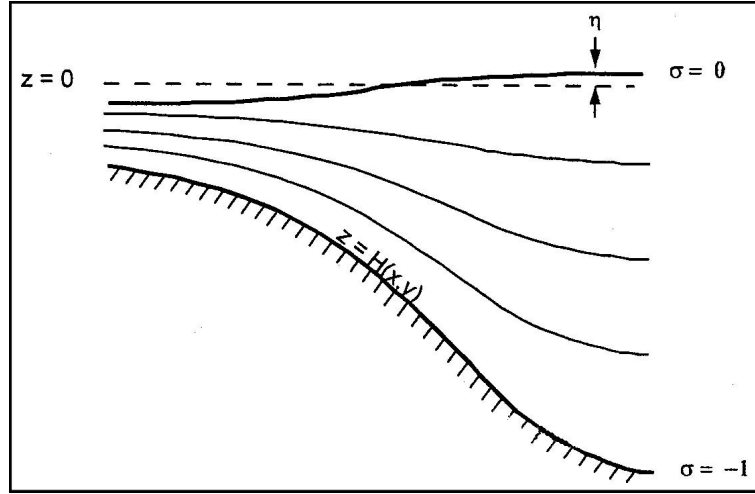
$$t^* = t \quad (4)$$

dove  $x, y, z$  sono le coordinate cartesiane convenzionali,  $H = (x, y)$  è il valore della batimetria e  $\eta = (x, y, t)$  è l'elevazione della superficie libera,  $D = H + \eta$ . Il valore di  $\sigma$  varia da 0 a -1: per  $\sigma = 0$  si avrà  $z = \eta$ ; per  $\sigma = -1$  si avrà  $z = -H$  (Figura 1).

Il principale vantaggio di un sistema di coordinate sigma è quello di conservare, al variare della profondità, il numero dei livelli verticali; si tratta perciò di una caratteristica del



modello molto importante, se non indispensabile, quando si trattano forti variazioni topografiche (Mellor et al., 1998).



**Figura 1 - Sistema rappresentato in coordinate sigma**

Per passare dal vecchio al nuovo sistema si applicano delle regole che valgono per un qualsiasi campo  $G$ . In generale si definisce il campo  $G$  come:

$$G(x, y, z, t) = G^*(x^*, y^*, \sigma, t^*) \quad (5)$$

dal quale si ottengono:

$$\frac{\partial G}{\partial x} = \frac{\partial G^*}{\partial x^*} - \frac{\partial G^*}{\partial \sigma} \frac{1}{D} (\eta_x + \sigma D_x) \quad (6)$$

$$\frac{\partial G}{\partial y} = \frac{\partial G^*}{\partial y^*} - \frac{\partial G^*}{\partial \sigma} \frac{1}{D} (\eta_y + \sigma D_y) \quad (7)$$

$$\frac{\partial G}{\partial z} = \frac{1}{D} \frac{\partial G^*}{\partial \sigma} \quad (8)$$

$$\frac{\partial G}{\partial t} = \frac{\partial G^*}{\partial t^*} - \frac{\partial G^*}{\partial \sigma} \frac{1}{D} (\eta_t + \sigma D_t) \quad (9)$$

### 1.3 Caratteristiche del modello di dispersione LAWAM

Il modello di dispersione lagrangiano sviluppato da G. Leuzzi e P. Monti, tiene conto della scala integrale della turbolenza e quindi, diversamente dai modelli euleriani basati sulle chiusure al primo ordine, è in grado di valutare correttamente le concentrazioni anche nelle vicinanze della sorgente.

I modelli lagrangiani stocastici rappresentano un valido strumento nello studio della dispersione d'inquinanti nei flussi turbolenti, ogni particella è considerata come un tracciante passivo e si assume che essa si muova indipendentemente dalle altre (modelli a particella singola). Il loro impiego è particolarmente adatto nei casi complessi, laddove altre classi di modelli, basati sull'approccio Euleriano, forniscono in genere risultati poco soddisfacenti (Monti, P., Leuzzi G., 2008).

Tra i vantaggi nell'uso dei modelli lagrangiani va ricordata l'intrinseca stabilità e conservatività degli schemi numerici, l'assenza di diffusività numerica e la possibilità di tenere conto delle scale integrali della turbolenza. I modelli lagrangiani simulano il moto delle particelle mediante dei processi stocastici.

Il LAWAM (*LAgrangian Water Model*) è un modello autoregressivo del primo ordine per le velocità (Monti & Leuzzi, 1996; Leuzzi & Monti, 1998; Leuzzi & Purini, 2005) ed è basato sulla condizione di "well-mixed" (Thomson, 1987), secondo la quale "se le particelle d'inquinante sono inizialmente ben mescolate esse devono permanere in tale stato".

Le traiettorie d'inquinante passivo in un flusso turbolento possono essere valutate risolvendo il sistema di equazioni differenziali stocastiche:

$$dU_i = a_i(X, U, t)dt + b_{ij}(X, U, t)d\xi_j \quad (10)$$

$$dX_i = U_i dt \quad (11)$$

dove  $t$ ,  $X$  e  $U$  rappresentano, rispettivamente, il tempo di volo, la posizione e la velocità della particella. I pedici  $i=1,2,3$  e  $j=1,2,3$  indicano le componenti lungo gli assi coordinati del sistema di riferimento  $(x_1, x_2, x_3)$ .

La (10) è nota come *Equazione di Langevin Generalizzata* ed è basata sull'ipotesi che la velocità della particella sia descritta mediante un processo di Markov. Il termine  $d\xi$

rappresenta un processo di Wiener con componenti indipendenti lungo i tre assi, i cui valori sono estratti da una funzione densità di probabilità Gaussiana a media nulla e deviazione standard  $(dt)^{1/2}$ . Le quantità  $a_i$  e  $b_{ij}$ , contenenti informazioni sulla turbolenza del flusso in termini di momenti statistici e loro derivate spazio-temporali, sono calcolate facendo appello all'equazione di Fokker-Plank (Thomson, 1987). L'evoluzione della velocità della particella  $U_i(X,t)$  può essere descritta come somma di due termini  $\bar{u}_i$  e  $U'_i$ , dove il primo corrisponde alla velocità media Euleriana nel punto  $(X,t)$  mentre il secondo rappresenta la fluttuazione turbolenta attorno la media. La (11) può essere riferita alla sola  $U'_i$ , pur continuando a soddisfare la condizione di “*well-mixed*”.

In una dimensione la (10) assume la forma:

$$dW = a dt + b d\xi \quad (12)$$

nella quale  $W$  rappresenta la fluttuazione turbolenta della velocità della particella.

Nel caso di turbolenza Gaussiana  $b = (\overline{w^2}/\tau)^{1/2}$ , mentre la grandezza  $a$  assume la forma:

$$a = -\frac{W}{\tau} + \frac{1}{2} \frac{\partial \overline{w^2}}{\partial z} + \frac{1}{2\overline{w^2}} \frac{\partial \overline{w^2}}{\partial t} W + \frac{1}{2\overline{w^2}} \frac{\partial \overline{w^2}}{\partial z} W^2 \quad (13)$$

dove  $\overline{w^2}$  è la varianza della velocità Euleriana e  $\tau$  è la scala di tempo integrale lagrangiana della turbolenza.

Il LAWAM integra la (12) lungo i tre assi del sistema di riferimento indipendentemente uno dall'altro. La soluzione è consistente con la formulazione tridimensionale completa quando la covarianza della velocità è nulla ed i gradienti delle varianze della velocità lungo le altre due direzioni sono nulli.

Il LAWAM impiega lo stesso grigliato utilizzato da POM ed assume come dati d'ingresso le uscite del modello idrodinamico. In particolare, le tre componenti del campo di velocità media sono direttamente rese disponibili dal POM mentre le tre deviazioni standard  $\sigma_i$  delle componenti della velocità (non calcolate dal POM) sono derivate dall'energia cinetica turbolenta  $q^2$  e dalla diffusività turbolenta della quantità di moto  $K_M$  (lungo l'asse verticale) mediante l'espressione (la notazione di Einstein non è applicata):

$$\sigma_i = \left( -2K_M \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} + \frac{2}{3} q^2 \right)^{1/2} \quad (14)$$

*Ferrero et al.* (2003), in uno studio sulla dispersione di inquinanti in atmosfera in ambiente vallivo, hanno dimostrato che la (14) è in grado di descrivere con ragionevole accuratezza le disomogeneità della turbolenza. In accordo con la teoria di *Taylor* (1921), la  $\tau_i$  lungo l'asse  $i$ -esimo è stata assunta pari al rapporto tra la  $K_M$  e la varianza della velocità lungo l'asse omologo (*Monti, P., Leuzzi, G., 2008*).

Nel presente lavoro il modello di dispersione LAWAM implementato presso l'ISPRA è stato applicato al caso del Mar Tirreno, in funzione del campo idrodinamico esistente nel bacino simulato con il modello di circolazione idrodinamica POM.

Il modello lagrangiano LAWAM utilizza come input gli output del modello idrodinamico POM; il file “fort41” in uscita dal POM contiene le informazioni relative all'evoluzione delle correnti nel bacino, il LAWAM, in funzione di questo campo idrodinamico simula la dispersione di inquinanti, il cui comportamento può essere assimilato a traccianti passivi.

Il modello LAWAM è costituito da 2 moduli: INLAWAM e LAWAM. Il primo modulo legge il file “fort41” rinominato “out” proveniente dal POM ed estrae i campi idrodinamici per il secondo modulo; inoltre esso legge il file “dominio.par” in cui troviamo numero di righe, di colonne e di strati sulla verticale.

Prima di lanciare il run del primo modulo bisogna specificare all'interno del programma inlawam.f scritto in linguaggio fortran, le coordinate della sorgente espresse in latitudine e longitudine, la portata  $q$  della sorgente puntiforme espressa in kg/s, la profondità  $h$  a cui avviene lo sversamento espressa in metri, e il periodo di tempo entro il quale avviene il rilascio dell'inquinante. Inoltre sono richiesti il numero di campi idrodinamici per la dispersione, l'intervallo temporale espresso in secondi che separa ogni campo idrodinamico e il passo temporale di integrazione in secondi.

Le caratteristiche del contaminante che viene rilasciato sono espresse nel modello in termini di velocità di sedimentazione, definita a partire dalla densità del materiale attraverso la legge di Stokes.

Il modello consente anche la simulazione del rilascio e della dispersione di due inquinanti che reagiscono in modo diverso durante il tempo di volo. In tal modo è possibile tener conto dei processi di “*weathering*” a cui vanno incontro i prodotti oleosi in mare.

Definite le caratteristiche della sorgente e dell’inquinante rilasciato, si manda in esecuzione il primo modulo per mezzo dello script `job_inlawam`.

Durante il run di INLAWAM vengono creati i files utili per proseguire la simulazione nelle cartelle “FLOW” ed “EMIS”, direttamente nel modulo LAWAM. Queste cartelle contengono: diffusività turbolenta, energia cinetica turbolenta, velocità sul piano orizzontale e verticale e la massa emessa in kg/s.

Il secondo modulo contiene il file `dati3d` in cui devo essere specificati una serie di parametri tra cui: il tipo di sorgente (areale o puntiforme), la velocità di sedimentazione, il numero di particelle rilasciate in ogni time step, l’intervallo di tempo per la lettura dei dati espressa in secondi e la durata massima della simulazione.

La simulazione comincia dopo aver lanciato lo script `job_lawam` che crea nella cartella CONC i files `conc.dat`, che sono in numero uguale ai campi in cui si vuole simulare la dispersione.

Nel presente lavoro è stato osservato l’andamento temporale della dispersione di petrolio per i diversi time step per mezzo di un programma scritto in linguaggio Matlab.

## 2 ANALISI STATISTICA DEI DATI DI VENTO

### 2.1 Dati di vento

I dati di vento analizzati in questo lavoro si riferiscono alle stazioni meteorologiche situate nel territorio di Messina e Reggio Calabria. Per ogni stazione si dispone di una serie temporale di rilevazioni di direzione e velocità del vento. Sono stati presi in considerazione i dati dei mesi invernali (dicembre, gennaio e febbraio) rilevati ogni ora, relativi al quinquennio 2005-2009 ed appartenenti alla *Rete Mareografica Nazionale* (RMN).

I dati di vento sono stati suddivisi in classi di direzione e di intensità; in particolare sono state considerate:

- 16 classi direzionali di uguale ampiezza angolare pari a 22,5 gradi come mostra la tabella 1 e la figura 2;
- 12 classi di intensità rispettando la scala Beaufort riportata in tabella 2.

Classe direzionale	Intervalli angolari (°)
1	0 - 22,5
2	22,5 - 45
3	45 - 67,5
4	67,5 - 90
5	90 - 112,5
6	112,5 - 135
7	135 - 157,5
8	157,5 - 180
9	180 - 202,5
10	202,5 - 225
11	225 - 247,5
12	247,5 - 270
13	270 - 292,5
14	292,5 - 315
15	315 - 337,5
16	337,5 - 360

Tabella 1 – Classi direzionali

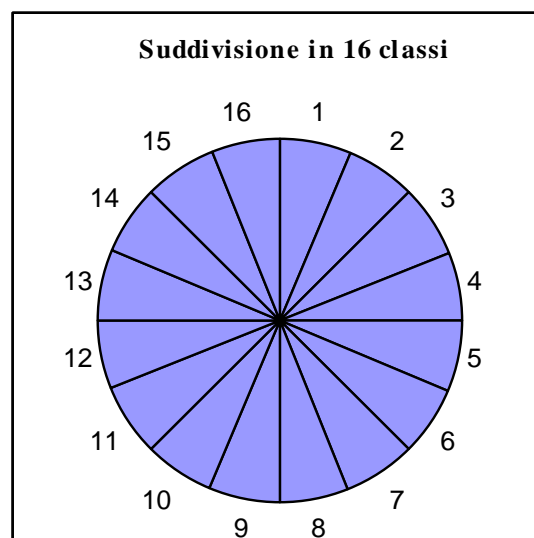


Figura 2 – Suddivisione in 16 classi

<b>SCALA BEAUFORT</b>	<b>Intervalli di velocità (m/s)</b>
<b>Calma</b>	<b>0 – 0,2</b>
<b>Bava di vento</b>	<b>0,3 – 1,5</b>
<b>Brezza leggera</b>	<b>1,6 – 3,3</b>
<b>Brezza tesa</b>	<b>3,4 – 5,4</b>
<b>Vento moderato</b>	<b>5,5 – 7,9</b>
<b>Vento teso</b>	<b>8,0 – 10,7</b>
<b>Vento fresco</b>	<b>10,8 – 13,8</b>
<b>Vento forte</b>	<b>13,9 – 17,1</b>
<b>Burrasca</b>	<b>17,2 – 20,7</b>
<b>Burrasca forte</b>	<b>20,8 – 24,4</b>
<b>Tempesta</b>	<b>28,5 – 32,6</b>
<b>Uragano</b>	<b>&gt; 32,7</b>

**Tabella 2 – Classi di velocità secondo la scala Beaufort**

Effettuata tale suddivisione in classi di direzione e di intensità del vento è stato possibile calcolare la frequenza percentuale corrispondente ad ogni classe esclusivamente per i dati dei mesi invernali per il quinquennio 2005-2009 secondo il seguente procedimento:

$$F(\%) = \frac{n_c}{N} \times 100 \quad (15)$$

dove  $F(\%)$  è la frequenza percentuale,  $n_c$  rappresenta il numero di volte in cui il vento presenta caratteristiche di una determinata classe ed  $N$  è il numero totale dei dati di vento dei mesi invernali di ciascun anno.

## 2.2 Analisi statistica dei dati di vento della stazione di Messina

Nella tabella 3 sono state calcolate le frequenze percentuali per ogni singolo anno, secondo la relazione 15, relative alle 16 classi direzionali con lo scopo di stabilire la classe di vento prevalente.

Le percentuali ottenute per ogni singolo anno sono messe a confronto con l'andamento complessivo dell'intero quinquennio 2005-2009.

<b>Classi direzionali (°)</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>	<b>Andamento complessivo</b>
<b>0 - 22,5</b>	8,37	8,83	10,56	12,74	7,34	<b>9,61</b>
<b>25,5 - 45</b>	3,44	4,63	6,64	6,34	3,37	<b>4,90</b>
<b>45 - 67,5</b>	1,48	1,67	1,83	1,14	1,47	<b>1,51</b>
<b>67,5 - 90</b>	0,69	0,59	0,52	0,45	0,60	<b>0,57</b>
<b>90 - 112,5</b>	0,69	0,75	0,42	0,40	0,54	<b>0,56</b>
<b>112,5 - 135</b>	0,74	0,81	0,63	0,64	0,71	<b>0,70</b>
<b>135 - 157,5</b>	1,28	1,94	0,68	0,94	1,31	<b>1,22</b>
<b>157,5 - 180</b>	8,12	7,32	7,90	7,23	9,90	<b>8,08</b>
<b>180 - 202,5</b>	14,71	14,10	12,40	13,53	17,02	<b>14,33</b>
<b>202,5 - 225</b>	7,04	8,50	6,22	7,63	10,39	<b>7,92</b>
<b>225 - 247,5</b>	3,54	4,41	2,62	3,67	3,21	<b>3,49</b>
<b>247,5 - 270</b>	2,61	2,26	1,20	1,83	3,37	<b>2,25</b>
<b>270 - 292,5</b>	6,15	5,60	4,13	4,11	5,00	<b>5,00</b>
<b>292,5 - 315</b>	11,61	11,89	12,45	10,60	11,09	<b>11,52</b>
<b>315 - 337,5</b>	12,50	12,49	18,46	14,07	13,05	<b>14,11</b>
<b>337,5 - 360</b>	17,03	14,21	13,34	14,67	11,64	<b>14,24</b>

**Tabella 3 – Frequenza percentuale delle diverse classi direzionali dei cinque anni messi a confronto con l'andamento complessivo (stazione di Messina)**

Dalla tabella 3 emerge che i settori angolari prevalenti sono:

- 292,5°- 22,5° direzione N-N-W con frequenza totale pari a 49,48%
- 157,5°-225° direzione S-S-W con frequenza totale pari a 30,32%

Questi due settori rappresentano insieme rappresentano ben il 79,80% del totale.

Allo stesso modo, tenendo conto della relazione 15, è stato possibile ottenere la frequenza percentuale per ogni classe di velocità come mostra la tabella 4.



<b>Classi di velocità (m/s)</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>	<b>Andamento complessivo</b>
<b>&gt; 32.7</b>	-	-	-	-	-	<b>-</b>
<b>28.5 - 32.6</b>	-	-	-	-	-	<b>-</b>
<b>20.8 - 24.4</b>	-	-	-	-	-	<b>-</b>
<b>17.2 - 20.7</b>	0,05	-	-	-	0,11	<b>0,03</b>
<b>13.9 - 17.1</b>	1,08	0,05	0,10	0,74	0,98	<b>0,60</b>
<b>10.8 - 13.8</b>	4,87	2,48	1,83	1,64	3,37	<b>2,85</b>
<b>8 - 10.7</b>	11,66	7,75	9,99	10,65	10,88	<b>10,22</b>
<b>5.5 - 7.9</b>	21,60	19,27	20,92	20,47	16,69	<b>19,85</b>
<b>3.4 - 5.4</b>	18,90	26,86	24,27	24,58	24,20	<b>23,69</b>
<b>1.6 - 3.3</b>	22,05	24,65	27,67	22,35	22,35	<b>23,78</b>
<b>0.3 - 1.5</b>	19,78	18,95	15,22	19,57	21,42	<b>18,99</b>

**Tabella 4 – Frequenza percentuale delle diverse classi di velocità dei cinque anni messi a confronto con l'andamento complessivo (stazione di Messina)**

Le classi direzionali con una frequenza elevata sono state sottoposte ad una ulteriore analisi. Dalla tabella 3 si è potuto risalire alle classi direzionali con frequenza percentuale maggiore del 7%. Per le classi tra loro adiacenti e caratterizzate da una frequenza percentuale maggiore del 7% sono stati raggruppati i dati di vento in modo da tener conto dell'intero settore prevalente.

Dall'analisi dei dati emerge una frequenza maggiore per i settori Nord, da 292,5° a 22,5°, e Sud, da 157,5° a 225°. A seguito di tale suddivisione è stata calcolata la frequenza percentuale per i settori prevalenti: il Nord e il Sud per ogni singolo anno. I risultati ottenuti per la stazione di Messina sono riportate nelle tabelle 5 e 6.

	<b>Settore Nord</b>				
	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>
<b>V (m/s)</b>	<b>292,5°-22,5°</b>	<b>292,5°-22,5°</b>	<b>292,5°-22,5°</b>	<b>292,5°-22,5°</b>	<b>292,5°-22,5°</b>
<b>&gt; 32.7</b>	-	-	-	-	-
<b>28.5 - 32.6</b>	-	-	-	-	-
<b>20.8 - 24.4</b>	-	-	-	-	-
<b>17.2 - 20.7</b>	-	-	-	-	-
<b>13.9 - 17.1</b>	0,30	0,05	-	0,74	0,27
<b>10.8 - 13.8</b>	2,81	1,29	0,94	1,14	0,82
<b>8 - 10.7</b>	4,33	2,85	4,86	5,45	4,24
<b>5.5 - 7.9</b>	11,07	7,91	8,94	10,85	6,47
<b>3.4 - 5.4</b>	9,69	13,94	14,38	13,03	10,77
<b>1.6 - 3.3</b>	12,45	12,49	17,57	12,09	10,39
<b>0.3 - 1.5</b>	8,86	8,88	8,11	8,77	10,17
	<b>49,51%</b>	<b>47,42%</b>	<b>54,81%</b>	<b>52,08%</b>	<b>43,12%</b>

**Tabella 5 - Frequenza percentuale per il settore Nord (Stazione di Messina)**

	<b>Settore Sud</b>				
	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>
<b>V (m/s)</b>	<b>157,5°-225°</b>	<b>157,5°-225°</b>	<b>157,5°-202,5°</b>	<b>157,5°-225°</b>	<b>157,5°-225°</b>
<b>&gt; 32.7</b>	-	-	-	-	-
<b>28.5 - 32.6</b>	-	-	-	-	-
<b>20.8 - 24.4</b>	-	-	-	-	-
<b>17.2 - 20.7</b>	0,05	-	-	-	0,11
<b>13.9 - 17.1</b>	0,64	-	0,10	-	0,60
<b>10.8 - 13.8</b>	1,43	0,86	0,68	0,45	2,23
<b>8 - 10.7</b>	6,50	3,93	3,66	3,32	6,14
<b>5.5 - 7.9</b>	8,66	8,77	8,11	7,48	8,32
<b>3.4 - 5.4</b>	5,86	7,97	4,45	7,98	9,79
<b>1.6 - 3.3</b>	3,49	5,81	2,09	5,50	7,23
<b>0.3 - 1.5</b>	3,25	2,58	1,20	3,67	2,88
	<b>29,87%</b>	<b>29,92%</b>	<b>20,29%</b>	<b>28,39%</b>	<b>37,30%</b>

**Tabella 6 - Frequenza percentuale per il settore Sud (Stazione di Messina)**

La direzione Nord è risultata prevalente e in alcuni casi, come nel 2007 e nel 2008, la frequenza supera addirittura il 50%, in particolar modo nel 2007 si evidenzia la frequenza più elevata, pari al 54,81%.

Altro settore direzionale prevalente è il Sud, da 157,5° a 225°. Nel 2009 si rinviene una frequenza pari al 37,30%.

### 2.3 Analisi statistica dei dati di vento della stazione di Reggio Calabria

La tabella 3.7 mostra le frequenze percentuali, ottenute mediante la relazione 15, per ogni singolo anno, relative alle 16 classi direzionali per la stazione di Reggio Calabria.

Per la stazione di Reggio Calabria sono stati ottenuti i risultati riportati nelle tabelle 7 e 8 dalle quali è possibile effettuare un confronto diretto con l'andamento complessivo del quinquennio 2005-2009.

<b>Classi direzionali (°)</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>	<b>Andamento complessivo</b>
<b>0 - 22,5</b>	16,41	12,87	18,13	20,12	13,73	<b>16,23</b>
<b>25,5 - 45</b>	7,68	5,56	7,18	6,24	8,63	<b>7,06</b>
<b>45 - 67,5</b>	5,07	4,95	5,81	5,03	5,19	<b>5,21</b>
<b>67,5 - 90</b>	17,31	21,07	17,56	16,49	16,18	<b>17,73</b>
<b>90 - 112,5</b>	4,46	5,61	4,15	5,17	5,66	<b>5,01</b>
<b>112,5 - 135</b>	2,66	4,62	3,35	3,43	4,15	<b>3,64</b>
<b>135 - 157,5</b>	2,13	3,11	2,41	2,47	4,29	<b>2,89</b>
<b>157,5 - 180</b>	9,01	7,64	8,31	5,61	10,52	<b>8,23</b>
<b>180 - 202,5</b>	8,82	7,50	6,75	7,06	6,93	<b>7,41</b>
<b>202,5 - 225</b>	1,85	2,50	1,27	2,61	3,07	<b>2,26</b>
<b>225 - 247,5</b>	1,14	0,75	0,90	1,60	1,65	<b>1,21</b>
<b>247,5 - 270</b>	0,66	0,66	0,57	0,77	0,66	<b>0,66</b>
<b>270 - 292,5</b>	0,76	0,85	0,80	0,87	1,27	<b>0,91</b>
<b>292,5 - 315</b>	2,04	2,36	1,51	1,40	1,37	<b>1,74</b>
<b>315 - 337,5</b>	3,60	4,76	3,54	3,53	4,91	<b>4,07</b>
<b>337,5 - 360</b>	16,41	15,18	17,75	17,60	11,79	<b>15,74</b>

**Tabella 7 – Frequenza percentuale per le diverse classi direzionali dei cinque anni messi a confronto con l'andamento complessivo (Reggio Calabria)**

I settori prevalenti per quanto riguarda l'andamento complessivo sono:

- 337,5°- 45° direzione N-N-E con frequenza pari a 39,03
- 67,5°- 90° direzione E con frequenza pari a 17,73
- 157,5°- 202,5° direzione S con frequenza pari a 15,64

Questi tre settori rappresentano il 72,40% del totale.

La direzione Est pur presentando un percentuale del 17,73% è caratterizzata da intensità di vento basse rispetto agli altri settori prevalenti, inoltre tale settore non risulta prevalente per la stazione di Messina.

<b>Classi di velocità (m/s)</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>	<b>Andamento complessivo</b>
<b>&gt; 32.7</b>	-	-	-	-	-	<b>-</b>
<b>28.5 - 32.6</b>	-	-	-	-	-	<b>-</b>
<b>20.8 - 24.4</b>	-	-	-	-	-	<b>-</b>
<b>17.2 - 20.7</b>	-	-	-	-	-	<b>-</b>
<b>13.9 - 17.1</b>	0,095	-	-	-	0,047	<b>0,03</b>
<b>10.8 - 13.8</b>	1,66	0,42	0,14	0,19	0,57	<b>0,60</b>
<b>8 - 10.7</b>	3,79	2,31	2,46	3,77	3,44	<b>3,15</b>
<b>5.5 - 7.9</b>	9,96	6,79	8,17	10,06	9,62	<b>8,91</b>
<b>3.4 - 5.4</b>	21,91	23,24	25,45	22,92	26,42	<b>23,99</b>
<b>1.6 - 3.3</b>	41,87	43,14	40,51	40,62	39,15	<b>41,06</b>
<b>0.3 - 1.5</b>	20,72	24,09	23,28	22,44	20,75	<b>22,26</b>

**Tabella 8 – Frequenza percentuale delle diverse classi di velocità dei cinque anni messi a confronto con l'andamento complessivo (Reggio Calabria)**

Anche per la stazione di Reggio Calabria facendo riferimento alla tabella 7, sono state raggruppate classi direzionali tra loro adiacenti con frequenza percentuale maggiore del 7% in modo tale da ottenere una suddivisione per settori direzionali prevalenti.

Le tabelle 9, 10 e 11 mostrano la frequenza percentuale relativa a ciascun settore prevalente.

	<b>Settore Nord</b>				
	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>
<b>V (m/s)</b>	<b>337,5°-45°</b>	<b>337,5°-22,5°</b>	<b>337,5°-45°</b>	<b>337,5°-22,5°</b>	<b>337,5°-45°</b>
<b>&gt; 32.7</b>	-	-	-	-	-
<b>28.5 - 32.6</b>	-	-	-	-	-
<b>20.8 - 24.4</b>	-	-	-	-	-
<b>17.2 - 20.7</b>	-	-	-	-	-
<b>13.9 - 17.1</b>	0,09	-	-	-	0,05
<b>10.8 - 13.8</b>	1,61	0,42	0,14	0,19	0,42
<b>8 - 10.7</b>	3,32	1,89	1,94	3,53	3,02
<b>5.5 - 7.9</b>	7,73	4,81	7,18	8,61	6,23
<b>3.4 - 5.4</b>	12,09	11,69	17,66	14,75	13,82
<b>1.6 - 3.3</b>	12,47	7,26	12,94	8,90	8,54
<b>0.3 - 1.5</b>	3,18	1,98	3,21	1,74	2,08
	<b>40,49%</b>	<b>28,05%</b>	<b>43,06%</b>	<b>37,72%</b>	<b>34,15%</b>

**Tabella 9 - Frequenza percentuale per il settore Nord (stazione di Reggio Calabria)**

	<b>Settore Est</b>				
	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>
<b>V (m/s)</b>	<b>67,5°-90°</b>	<b>67,5°-90°</b>	<b>67,5°-90°</b>	<b>67,5°-90°</b>	<b>67,5°-90°</b>
<b>&gt; 32.7</b>	-	-	-	-	-
<b>28.5 - 32.6</b>	-	-	-	-	-
<b>20.8 - 24.4</b>	-	-	-	-	-
<b>17.2 - 20.7</b>	-	-	-	-	-
<b>13.9 - 17.1</b>	-	-	-	-	-
<b>10.8 - 13.8</b>	-	-	-	-	-
<b>8 - 10.7</b>	-	-	-	-	-
<b>5.5 - 7.9</b>	-	-	-	0,05	-
<b>3.4 - 5.4</b>	2,23	2,73	1,09	1,74	2,17
<b>1.6 - 3.3</b>	10,81	14,57	11,43	11,07	10,09
<b>0.3 - 1.5</b>	4,27	3,77	5,05	3,63	3,92
	<b>17,31%</b>	<b>21,07%</b>	<b>17,56%</b>	<b>16,49%</b>	<b>16,18%</b>

**Tabella 10 - Frequenza percentuale per il settore Est (stazione di Reggio Calabria)**

	<b>Settore Sud</b>				
	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>
<b>V (m/s)</b>	<b>157,5°-202,5°</b>	<b>157,5°-202,5°</b>	<b>157,5°-202,5°</b>	<b>180°-202,5°</b>	<b>157,5°-202,5°</b>
<b>&gt; 32.7</b>	-	-	-	-	-
<b>28.5 - 32.6</b>	-	-	-	-	-
<b>20.8 - 24.4</b>	-	-	-	-	-
<b>17.2 - 20.7</b>	-	-	-	-	-
<b>13.9 - 17.1</b>	-	-	-	-	-
<b>10.8 - 13.8</b>	-	-	-	-	-
<b>8 - 10.7</b>	0,05	-	-	-	-
<b>5.5 - 7.9</b>	1,28	0,19	-	-	0,85
<b>3.4 - 5.4</b>	4,22	3,39	3,78	1,50	4,86
<b>1.6 - 3.3</b>	9,20	7,31	7,41	4,06	8,82
<b>0.3 - 1.5</b>	3,08	4,24	3,87	1,50	2,92
	<b>17,83%</b>	<b>15,13%</b>	<b>15,06%</b>	<b>7,06%</b>	<b>17,45%</b>

**Tabella 11 - Frequenza percentuale per il settore Sud (stazione di Reggio Calabria)**

Come si può osservare i settori prevalenti sono Nord, Est e Sud.

Anche in questo caso la direzione di provenienza principale è il Nord, con un massimo nel 2007 con una frequenza pari a 43,06%.

In conclusione di questa analisi dei dati vento è stato possibile giungere ad individuare due episodi in grado di rappresentare le due condizioni di vento tipiche dell'area in esame, ovvero una provenienza del vento dai settori Nord e Sud, che sono risultati i prevalenti per entrambe le stazioni analizzate.

Per il periodo in grado di rappresentare una determinata situazione verranno utilizzati i dati di vento dell'ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*), come input nel modello di circolazione POM, che a sua volta fornirà dei dati di output che saranno di ingresso al modello di dispersione LAWAM

I due episodi individuati andranno a rappresentare:

- situazione con vento prevalentemente da Nord
- situazione con vento prevalentemente da Sud

Dall'osservazione dei dati è stato possibile risalire a periodi della durata di un mese in cui si sono susseguite le condizioni che si vogliono rappresentare.

SITUAZIONE	PERIODO
Vento prevalente da Nord	20/01-20/02/2005
Vento prevalente da Sud	1-31/12/2004

**Tabella 12 – Condizioni di vento tipiche**

### 3 APPLICAZIONE DEL MODELLO POM

#### 3.1 Caratteristiche dell'area in esame

L'area oggetto di studio, il *Mar Tirreno*, può essere considerato un bacino di passaggio in cui gli scambi con il resto del Mediterraneo avvengono principalmente attraverso tre canali: il *Canale di Sardegna* a sud che permette il collegamento con il Mediterraneo occidentale, il *Canale di Corsica* a nord e il *Canale di Sicilia* a sud che garantisce l'apertura con il Mediterraneo orientale.

Sono numerosi gli studi che hanno interessato quest'area, permettendo di definirne determinate caratteristiche fisiche, che nel presente lavoro sono state riprodotte attraverso l'implementazione del modello POM.

Secondo quanto riportato in letteratura, le acque sono costituite dalla sovrapposizione di quattro strati (*Serraval, R., Cristofalo, G. C., 1999*):

- uno strato superficiale (*Modified Atlantic Water* o *MAW*) che interessa i primi 200 m di profondità con temperatura potenziale variabile tra 13.5 e 13.9°C e salinità compresa tra 38.0 e 38.5 psu;
- uno strato sottostante (*Levantine Intermediate Water* o *LIW*) a profondità comprese tra 250 e 700 m caratterizzato da una temperatura potenziale tra 13.5 e 13.9°C e salinità variabile tra 38.4-38.6 psu;
- uno strato più profondo e denso (*Western Mediterranean Deep Water* o *WMDW*) localizzato tra i 700 ed i 3000 m con temperatura potenziale compresa tra 12.90 e 13.50°C e salinità variabile tra 38.4 e 38.6 psu;
- uno strato di fondo che raggiunge profondità superiori ai 4200 m e si origina nel Mediterraneo orientale (*Aegean Deep Water* o *AeDW* e *Adriatic Deep Water* o *AdDW*).

Come emerge in numerosi studi di Clode Millot (1999), lo strato più superficiale è costituito dalla *MAW*; uno strato di acqua di origine atlantica, che dopo essere entrato nel Mar Mediterraneo dallo Stretto di Gibilterra scorre lungo le coste algerine e tunisine ed in seguito il suo flusso si suddivide in due vene: una si porta nel Mediterraneo orientale, la seconda entra nel Tirreno. Tale flusso scorre lungo le coste della Sicilia ed inizia il suo percorso verso nord. In corrispondenza dell'Isola d'Elba, circa due terzi del flusso proseguono verso il Bacino Ligure-Provenzale attraverso il Canale di Corsica, mentre il

flusso restante fluisce lungo le coste della Corsica per poi uscire dal Canale di Sardegna. Le caratteristiche del flusso della *MAW* in entrata dal Canale di Sardegna variano nel corso dell'anno; i massimi valori di flusso si registrano durante i mesi invernali e primaverili, mentre si osserva una diminuzione durante i mesi estivi e autunnali.

Lo strato d'acqua intermedio nel Mar Tirreno è costituito dalla *LIW*. Una massa d'acqua che si forma in inverno nel bacino levantino settentrionale, vicino l'isola di Rodi, dove sia l'elevata evaporazione, dovuta a forte vento, sia la mancanza di apporti fluviali, fanno sì che la *LIW* sia caratterizzata da elevata salinità. In parte la *LIW* formatasi nel bacino orientale scorre verso ovest ed una vena consistente entra nel Tirreno attraverso il Canale di Sicilia, dove viene deviata verso destra, lungo le coste siciliane. La corrente fluisce diretta verso nord lungo le coste peninsulari, fino al Canale di Corsica, dove secondo quanto affermato da Hopkins, circa un terzo del flusso attraversa il canale ed i due terzi si portano verso sud scorrendo lungo le coste della Corsica, per uscire attraverso il Canale di Sardegna. L'uscita della *LIW* presenta un andamento opposto rispetto alla corrente superficiale; i valori minimi di *outflow* si riscontrano durante l'inverno e la primavera, mentre in estate e in autunno si hanno i valori massimi.

La *WMDW* si forma nel bacino Liguro-Provenzale, durante i mesi invernali, e descrive un gyre anticiclonico nel bacino algerino. La parte più superficiale, quindi la più leggera di questa massa d'acqua attraversa il Canale di Sicilia, entrando nel Mar Tirreno. Si porta nella parte profonda del bacino dove si mescola con le acque residenti, formando la *TDW* (*Tyrrhenian Dense Water*). La *TDW*, scorre lungo le coste italiane formando un gyre ciclonico nel bacino e uscendo attraverso il Canale di Sardegna (Millot e Taupier, 2004 – Millot, 1999).

### 3.2 Implementazione del POM

Nel presente lavoro è stato utilizzato il modello idrodinamico POM implementato presso il dipartimento *Tutela acque interne e marine dell'ISPRA*, con lo scopo di riprodurre la circolazione tipica della stagione invernale nel Mar Tirreno.

Come già detto nel paragrafo precedente, il massimo valore di flusso della *MAW* che entra attraverso il Canale di Sardegna si registra proprio durante i mesi invernali e primaverili, mentre durante la stagione estiva e autunnale tale flusso tende a scorrere lungo le coste



della Tunisia verso sud portandosi nel Mediterraneo orientale, e il flusso in uscita dal Canale di Corsica tende ad indebolirsi (Astraldi, M., Gasparini, G. P., 1991).

L'elaborazione del modello POM si articola in più passaggi conseguenti l'uno all'altro in cui i files di output della fase precedente diventano di input per quella successiva.

La prima fase consiste nella preparazione dei campi di temperatura, salinità e vento necessari per riprodurre le condizioni tipiche del periodo in esame.

La seconda fase, detta di spin-up, consente di raggiungere le condizioni stazionarie del sistema, in modo tale da riprodurre le principali caratteristiche della circolazione generale stagionale del bacino, utilizzando come input i campi medi di temperatura, salinità e stress provocato dal vento nel periodo di riferimento. La fase di spin-up deve avere una durata tale da permettere il raggiungimento di una situazione stazionaria.

La terza ed ultima fase utilizza come input il campo idrodinamico stabilizzato ottenuto come output dal passaggio precedente per effettuare una simulazione forzata con il campo di vento effettivo registrato ogni 24 ore relativo al periodo in esame.

La griglia di calcolo è costituita da una matrice 164x244x25 definita nel file Gridborder con origine nell'angolo nord-ovest alla latitudine 43° 00' 00" e longitudine 9.3° 00' 00", ed è caratterizzata da un doppio refinement ovvero un infittimento del grigliato in prossimità del Tirreno meridionale in modo tale da aumentare la risoluzione in corrispondenza dell'area oggetto di studio.

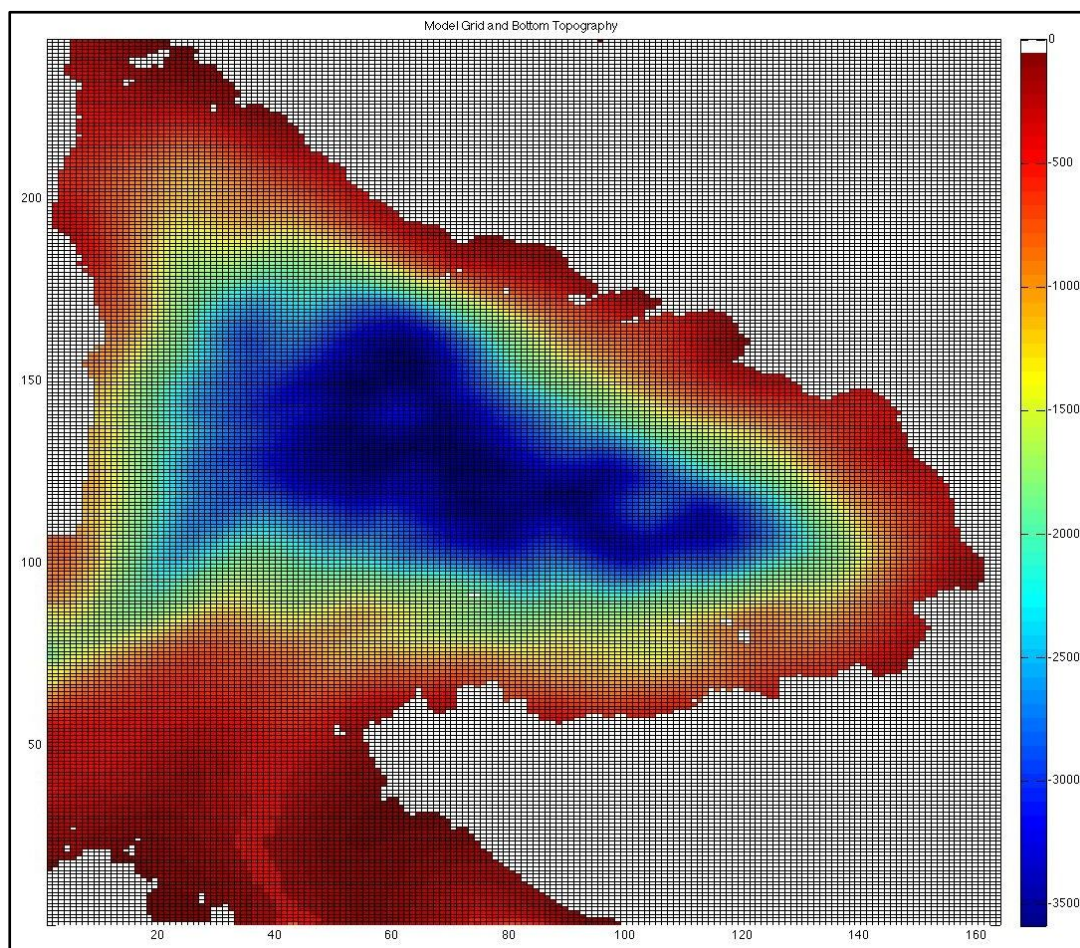
Al termine di ogni elaborazione i risultati possono essere verificati graficamente con il programma Matlab.

### **3.2.1 Batimetria**

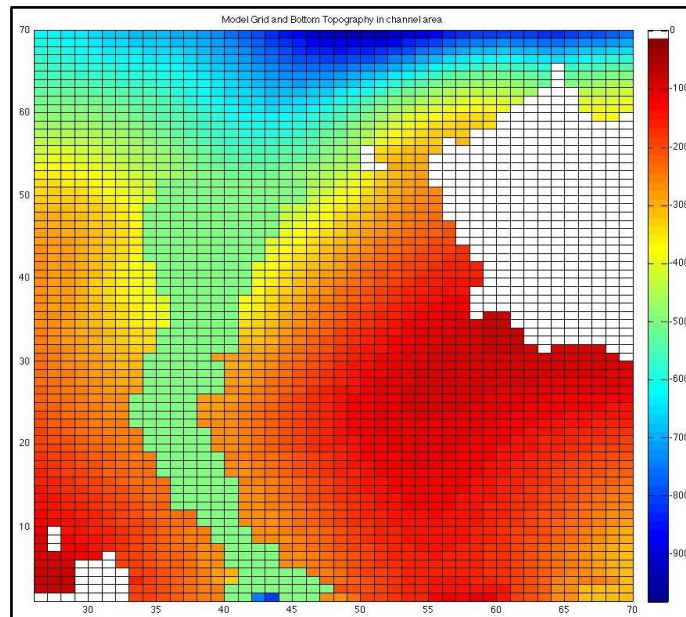
Per la batimetria si è fatto riferimento al database ETOPO1 del *National Geophysical Data Center* (NGDC). I valori dei dati batimetrici sono in metri ed ognuno di essi è riferito al valore centrale della griglia. La serie di dati in Europa occidentale è caratterizzata da una risoluzione orizzontale di un minuto di latitudine e longitudine, cioè 1/60°.

In una prima fase, mediante l'utilizzo di un programma in linguaggio Matlab, si è provveduto a lisciare la batimetria (Figura 3) per ridurre l'errore di gradiente di pressione, dovuto all'utilizzo delle coordinate sigma (Mellor et al. 1994), e che aumenta in corrispondenza di una batimetria troppo ripida. Sono state apportate delle modifiche in modo tale da riprodurre il più fedelmente possibile la circolazione tipica del Mar Tirreno

nei mesi invernali. Per ottenere questo risultato è stato elaborato il file di batimetria lasciando aperti il Canale di Sicilia a sud, il Canale di Sardegna ad ovest e il Canale di Corsica a nord; inoltre, si è intervenuti sul canyon presente nel Canale di Sicilia ridefinendone i valori di profondità (Figura 4) che l'operazione di smoothing aveva ricoperto, e sulla morfologia costiera a sud della Sardegna. Particolare cura è stata dedicata alle operazioni di smoothing, con lo scopo di ridurre i problemi di convergenza del modello, senza alterare in modo significativo le caratteristiche della batimetria, per esempio la presenza del profondo canyon nel canale di Sicilia.



**Figura 3 – Topografia e griglia di calcolo del dominio (Profondità in metri)**



**Figura 4 - Zoom del Canyon di Sicilia**

### 3.2.2 Dati di temperatura e salinità

Il modello è stato inizializzato con i campi di temperatura e di salinità medi del MED6, ovvero dati climatologici ricostruiti sulla base di un database storico idrologico MEDATLAS. Tali dati sono rappresentati da campi tridimensionali immagazzinati sotto forma di matrici 3D su una griglia regolare di  $0.25^\circ$ .

Per il campo di temperatura superficiale (*SST*, *Sea Surface Temperature*) si è fatto riferimento ai dati satellitari acquisiti dal MODIS (*Moderate Resolution Image Spectroradiometer*), che misura la *skin temperature* ovvero la temperatura riferita al sottilissimo strato più superficiale del mare dello spessore di pochi micron.

Il MODIS ha un intervallo di acquisizione dei dati ripartito in 36 bande a lunghezza d'onda diversa ed una risoluzione spaziale di 250 m in due bande (canali 1-2), di 500 m in 5 bande (canali 3-7) e di 1 km in 29 bande (canali 8-36). Sono equipaggiati satelliti polari AQUA EOS (*Earth Observing System*) e TERRA EOS della NASA, che percorrono un'orbita eliosincrona, ovvero cambiano la loro inclinazione in modo tale da sorvolare la stessa area alla stessa ora solare.

### 3.2.3 Dati di vento

I dati di vento sono ottenuti dall'ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*), con un campo misurato ogni 6 ore.

Nella fase di spin-up è posto come input il campo medio del periodo in esame, che deriva dalla media dei dati di vento relativi al mese di riferimento in grado di fornire risultati rappresentativi delle caratteristiche del periodo.

Per la fase successiva, ossia per il run non climatologico, sono stati utilizzati i dati di vento relativi al mese in esame con un campo di vento ogni 24 ore, ottenendo quindi delle informazioni istantanee dei campi, non più mediati ma relativi ad un preciso istante temporale.

### 3.2.4 Condizioni al contorno

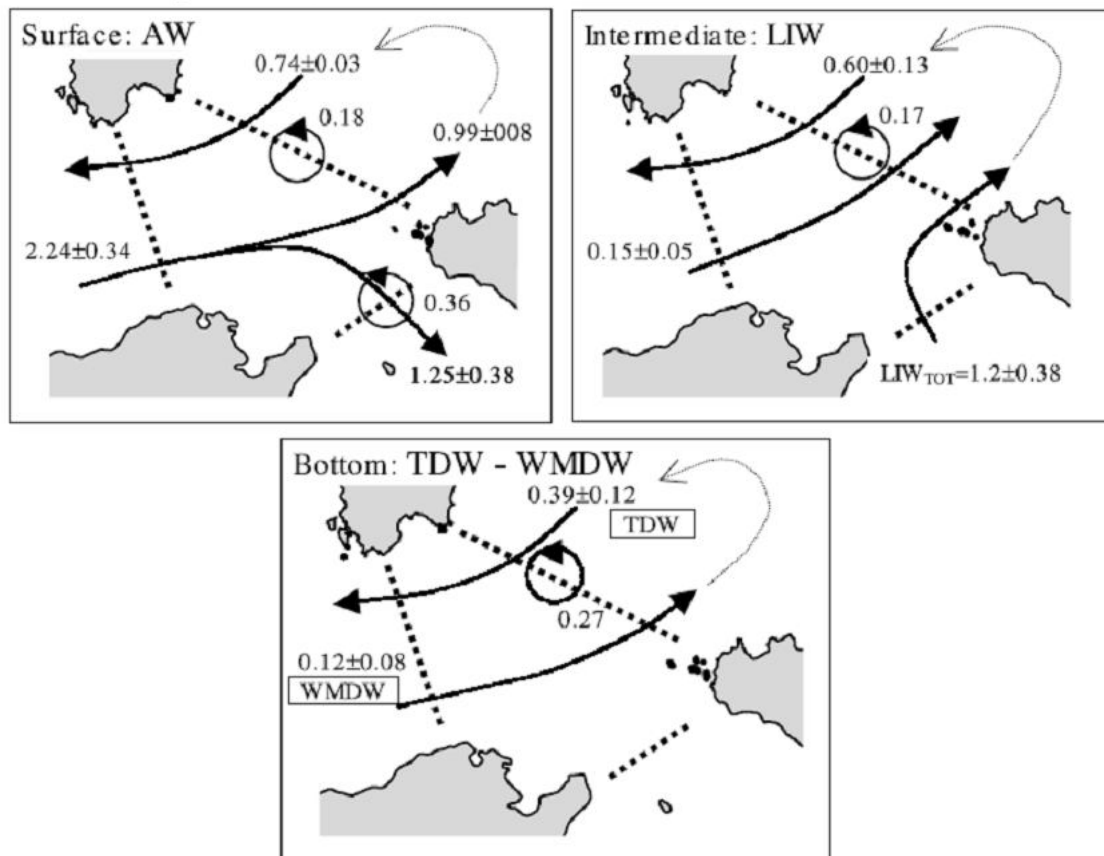
Grazie agli studi precedentemente svolti (*Vetrano, A., et al., 2004*) che hanno interessato l'area in esame, è stato possibile disporre di range di variabilità dei diversi flussi in entrata e in uscita dal bacino tirrenico, permettendo quindi di raggiungere l'obiettivo prefissato, ovvero stabilire le condizioni al contorno ottimali in grado di riprodurre la circolazione invernale descritta in letteratura (*Millot, C., 1999*).

La scelta dei valori dei flussi per le correnti in inflow ed outflow, si è rivelata di particolare importanza ed è stata effettuata tenendo conto dei dati presenti in letteratura nei quali si evidenziano una forte corrente superficiale di acqua atlantica proveniente dal bacino di Algeria e un flusso in uscita nella parte settentrionale del Canale di Sardegna che interessa principalmente profondità intermedie.

Pertanto è stato posto un flusso in entrata nel bacino tirrenico nella parte meridionale del Canale di Sardegna, e un flusso in uscita nella parte settentrionale, mentre il flusso in uscita dal canale di Corsica è stato ottenuto dalla differenza tra i flussi in entrata e in uscita dal Canale di Sardegna. Per il Canale di Sicilia si è osservato che i flussi medi sulla verticale in entrata e in uscita si compensano nei mesi invernali, per cui sono stati posti a zero.

In figura 5 sono riportati i flussi orizzontali con associata deviazione standard per la stagione invernale, che attraversano le tre sezioni esaminate in letteratura (*Vetrano et al., 2004*).

In figura 6 è riportata la sezione del Canale di Sardegna con la distribuzione delle velocità orizzontali. Osservando tale sezione è stato scelto il numero e la posizione dei punti in cui la velocità della corrente è posta pari a zero, determinando una zona di transizione tra il flusso in entrata e quello in uscita. Osservando tale figura e constatando che l'area caratterizzata dal colore grigio rappresenta il flusso in entrata, e l'area bianca è il flusso in uscita, è stata individuata la zona di transizione in prossimità delle coordinate (7, -1000). Nel presente studio sono stati uguagliati a zero i flussi corrispondenti alle celle con profondità variabili circa tra -900 e -1100 metri in corrispondenza del Canale di Sardegna rappresentante la zona di transizione tra l'acqua in entrata e in uscita dal bacino.



**Figura 5 - Flussi orizzontali (Sv) con associata deviazione standard per la stagione invernale (Vetrano et al., 2004)**

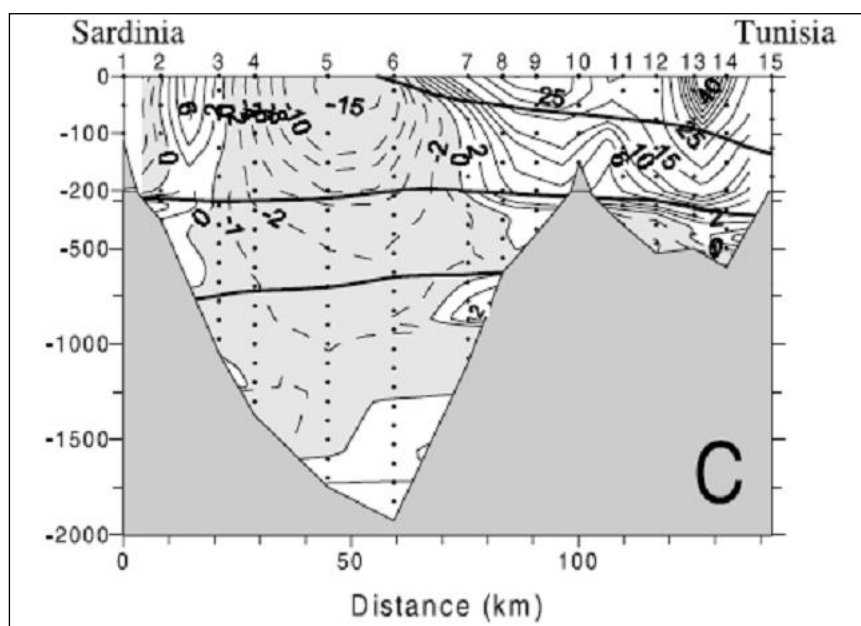


Figura 6 -Sezione del Canale di Sardegna (Vetrano et al., 2004)

Le condizioni al contorno in grado quindi di riprodurre la circolazione tipica del Mar Tirreno durante i mesi invernali sono riportate in tabella 13.

	<b>Direzione del flusso</b>	<b>Flusso (Sv)</b>
<b>Canale di Sardegna</b>	Outflow	1,55
	Inflow	2,2
<b>Canale di Corsica</b>	Outflow	0,65
<b>Canale di Sicilia</b>	Outflow	-
	Inflow	-

Tabella 13 –Condizioni al contorno utilizzate



### 3.3 Casi studio

Lo studio dei dati di vento acquisiti dalla *Rete Mareografica Nazionale (RMN)* per il quinquennio 2005-2009, ha portato a selezionare determinati periodi della durata di un mese in cui è stata rilevata una direzione prevalente di provenienza del vento.

In particolare sono stati definiti due casi differenti:

- vento prevalente da nord,
- vento prevalente da sud.

Il primo caso riguarda il periodo che va dal 20 gennaio al 20 febbraio 2008 in cui è stato osservato un campo di vento proveniente prevalentemente dal settore settentrionale.

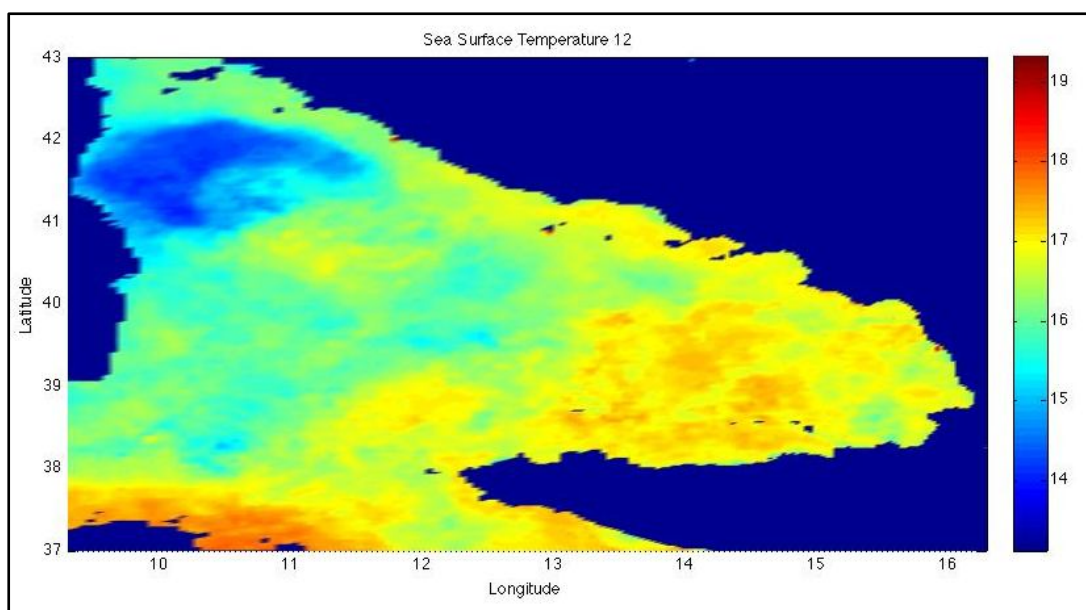
Il campo di temperatura superficiale (*Sea Surface Temperature, SST*) utilizzato come input al modello è quello medio osservato da satellite, acquisito dal sensore MODIS (*Moderate Resolution Image Spectroradiometer*) relativo al mese di febbraio 2008.

Il campo di salinità utilizzato è quello del MED6, relativo al mese di febbraio, ricostruito sulla base di un database storico idrologico MEDATLAS.

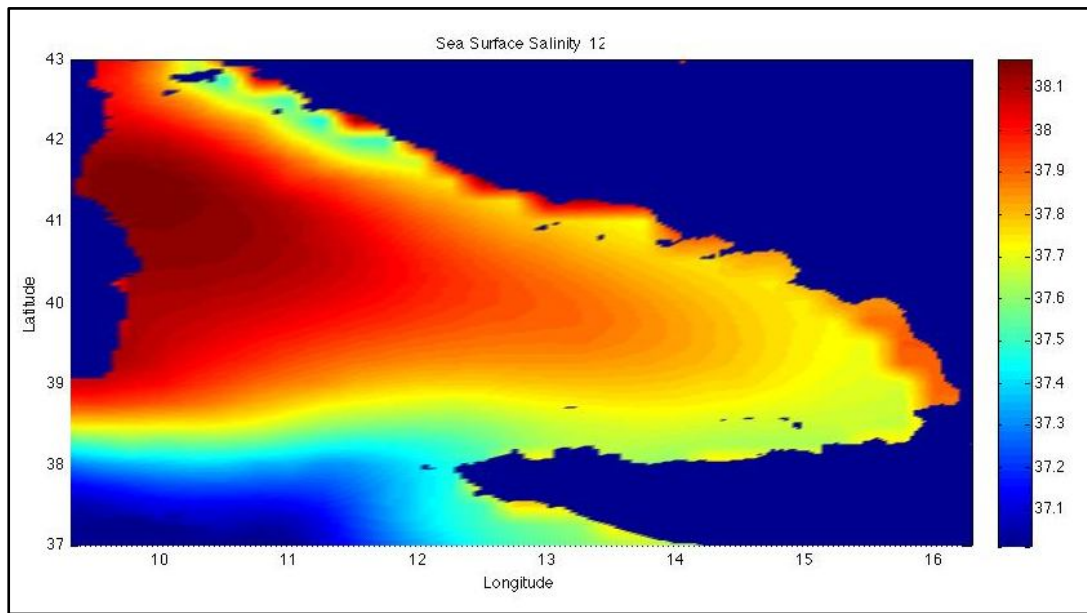
Il secondo caso interessa il periodo che va dal 1 al 31 dicembre 2004 in cui si è osservato un vento proveniente principalmente dal settore meridionale

Il campo di temperatura superficiale (*Sea Surface Temperature, SST*) acquisito dal sensore MODIS per il mese di dicembre 2004 è riportato in figura 7.

Il campo di salinità riportato in figura 8 è quello del MED6, relativo al mese di dicembre 2004



**Figura 7 - Campo di temperatura superficiale (MODIS)**



**Figura 8 - Campo di salinità superficiale (MED6)**

Per ognuno dei precedenti casi sono stati estratti i dati del periodo di riferimento dall'ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) con un campo di vento analizzato ogni 6 ore, e si è provveduto a mediarli per avviare la fase di spin-up.

In generale può risultare difficile per i modelli di circolazione globale e a scala di bacino raggiungere uno stato stazionario; nel caso specifico è stata elaborata in modo consistente la fase di spin-up, e dopo un'attenta analisi di sensibilità in cui sono state esaminate diverse configurazioni, si è giunti alle condizioni al contorno ottimali in grado di riprodurre il campo idrodinamico tipico della stagione invernale.

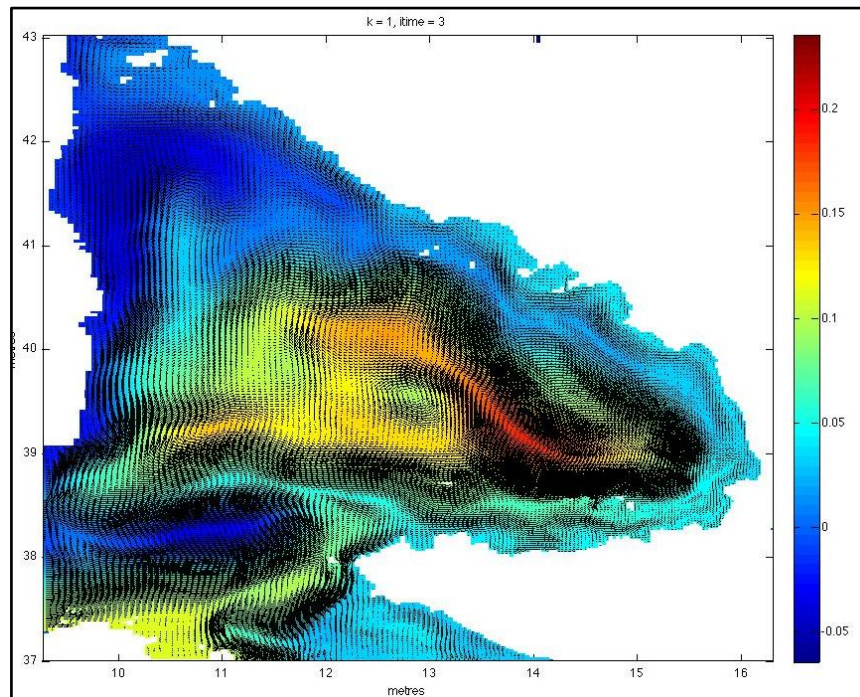
Il tempo di elaborazione necessario al modello per raggiungere tale situazione è stato di 120 giorni.

Al termine della fase di spin-up si è giunti ad una condizione in cui sono rappresentati i tratti tipici della circolazione tirrenica della stagione invernale. La corrente in entrata dal Canale di Sardegna si immette nel Mar Tirreno e inizia il suo percorso verso nord. Nella zona settentrionale del bacino tirrenico, la corrente esce in parte dal Canale di Corsica, in parte si porta a sud lungo le coste della Corsica e della Sardegna.

Si può osservare inoltre, un vortice freddo ad est delle Bocche di Bonifacio, a sud del quale viene a formarsi un gyre anticiclonico.

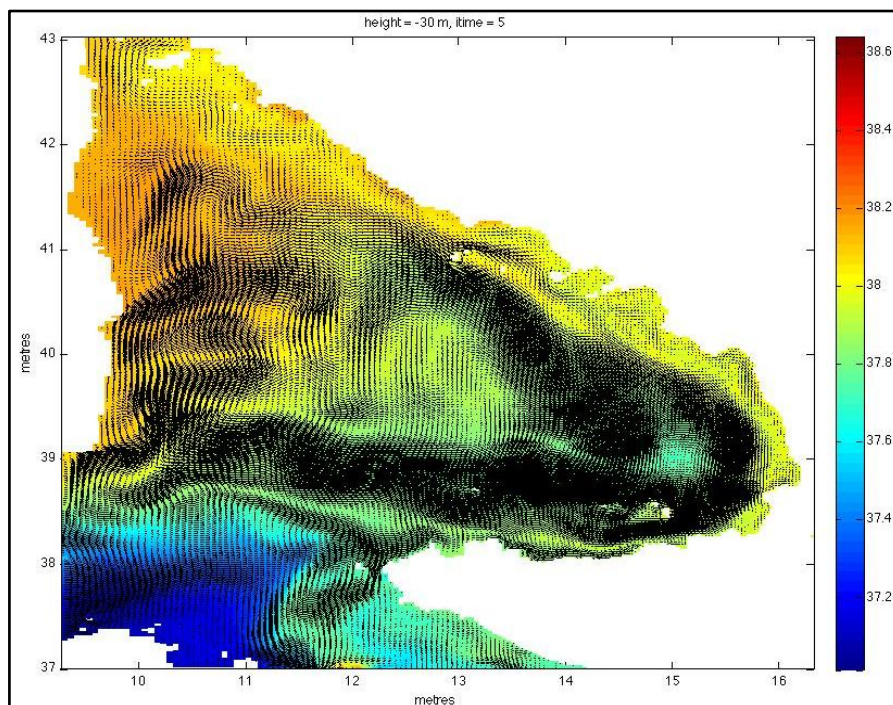
La figura 9 mostra il campo di elevazione superficiale al termine dello spin-up.





**Figura 9 - Campo di elevazione superficiale**

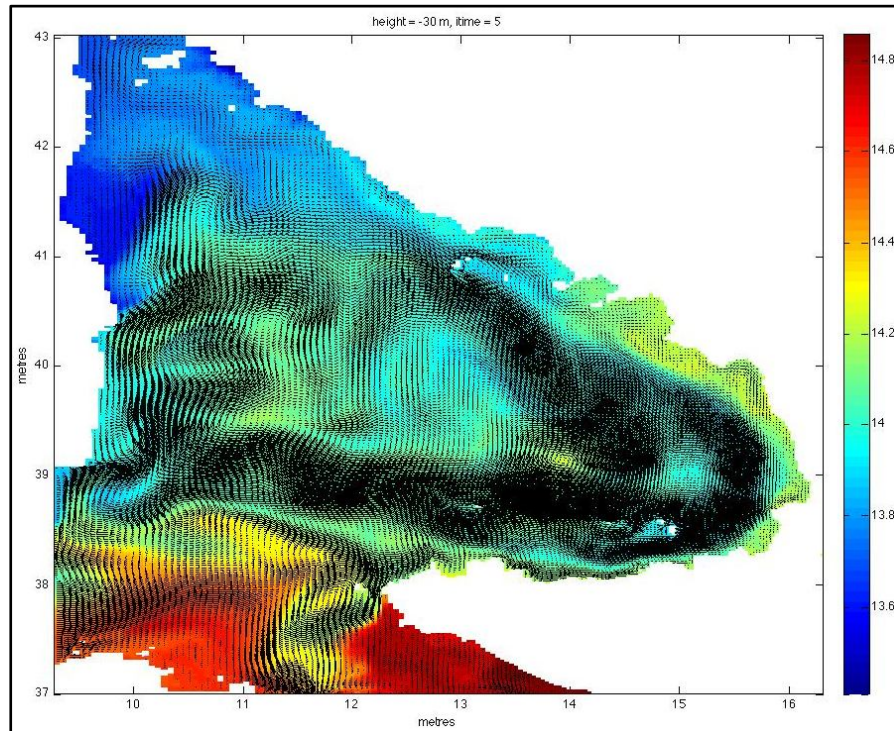
In figura 10 sono mostrati i campi di salinità alla profondità di 30 metri e il campo di velocità orizzontale rappresentante il flusso della *MAW* dopo 120 giorni di simulazione.



**Figura 10 - Campo di salinità a 30 metri**

In figura 11 si può osservare il campo di temperatura superficiale con il campo di velocità orizzontale dopo 120 giorni di simulazione.

Si evidenzia la presenza di un vortice freddo ad est delle Bocche di Bonifacio, a sud del quale viene a formarsi un gyre anticiclonico.



**Figura 11 - Campo di temperatura a 30 metri**

Il campo idrodinamico generato dalla fase di spin-up dopo 120 giorni di simulazione è stato utilizzato come condizione iniziale per effettuare un run di 30 giorni con un campo di vento ogni 24 ore analizzato dall'ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) relativo al periodo in esame.

Il campo idrodinamico generato è stato utilizzato come input per le applicazioni del modello di dispersione LAWAM.

## **4 VALUTAZIONE DELLA DISPERSIONE DI PETROLIO: APPLICAZIONE DEL MODELLO LAWAM**

### **4.1 Simulazioni di oil spill**

Nel presente studio è stato considerato il trasporto di una sostanza avente una velocità di galleggiamento pari a 0,0001 m/s in modo tale da simulare la dispersione di un olio leggero con densità minore dell'acqua marina. Non si è tenuto conto dei processi di degradazione dell'inquinante e delle variazioni di densità che avvengono a media e lunga scala temporale.

Le caratteristiche del vento a scala di bacino possono influenzare notevolmente il trasporto e la dispersione del contaminante; per tale motivo si è ritenuto necessario effettuare varie simulazioni che riproducessero la dispersione di petrolio in differenti condizioni di vento.

In particolare, a seguito dell'analisi dei dati di vento riportata nel capitolo 3, sono stati selezionati determinati intervalli temporali della durata di un mese in cui è stata rilevata una direzione prevalente di provenienza del vento, e dopo aver riprodotto un campo idrodinamico per le diverse condizioni meteorologiche, con campi di vento giornalieri, si è provveduto ad avviare le simulazioni di oil spill.

In tal modo è stata stabilita l'influenza della provenienza del vento in primo luogo sul campo idrodinamico del bacino tirrenico e, in modo indiretto, sulla dispersione di inquinante a parità di punto di sversamento.

Inoltre è stato ritenuto opportuno valutare l'influenza del posizionamento della sorgente sulla dispersione a parità di condizioni di vento. La scelta dei punti in cui effettuare i rilasci è stata fatta in modo tale da porre l'attenzione sulle zone più a rischio del Tirreno meridionale, interessate da intenso traffico petrolifero.

Le simulazioni di oil spill sono state effettuate utilizzando un campo idrodinamico relativo al mese di simulazione che ha seguito la fase di spin-up in cui il sistema è stato forzato con dati di vento giornalieri.

Gli incidenti sono stati simulati ipotizzando uno sversamento di 8,10 kg/s di inquinante passivo a bassa densità emesso in modo continuo per 24 ore, per un totale di 700 tonnellate, a 2 metri di profondità in diversi punti del bacino tirrenico.

## 4.2 Influenza del vento sulla dispersione

Una volta avvenuto il rilascio, viene a formarsi una grande chiazza di petrolio coesiva, che tende a propagarsi ed ad allargarsi in funzione delle sue caratteristiche fisico-chimiche, ed è trasportata dai venti e dalle correnti superficiali ad una velocità che, da studi ed osservazioni, risulta essere circa pari ad una piccola percentuale della velocità del vento.

Indagini sperimentali hanno mostrato che la macchia d'olio si muove con una velocità pari a 3-4 % nella direzione del vento. Col passare del tempo, i venti e le correnti "stracciano" la chiazza di petrolio in piccole zone, in un intervallo di tempo che dipende dalle condizioni meteorologiche e dalle caratteristiche dell'olio.

È bene tener presente che nelle simulazioni effettuate il campo di vento agisce in maniera indiretta sul trasporto e sulla dispersione del petrolio, infatti il modello di dispersione tiene conto esclusivamente del campo idrodinamico in uscita dal POM che, a sua volta, è stato forzato con un campo di vento giornaliero.

Nella nostra indagine sono state effettuate simulazioni di oil spill per due casi differenti:

- vento prevalente da nord,
- vento prevalente da sud,

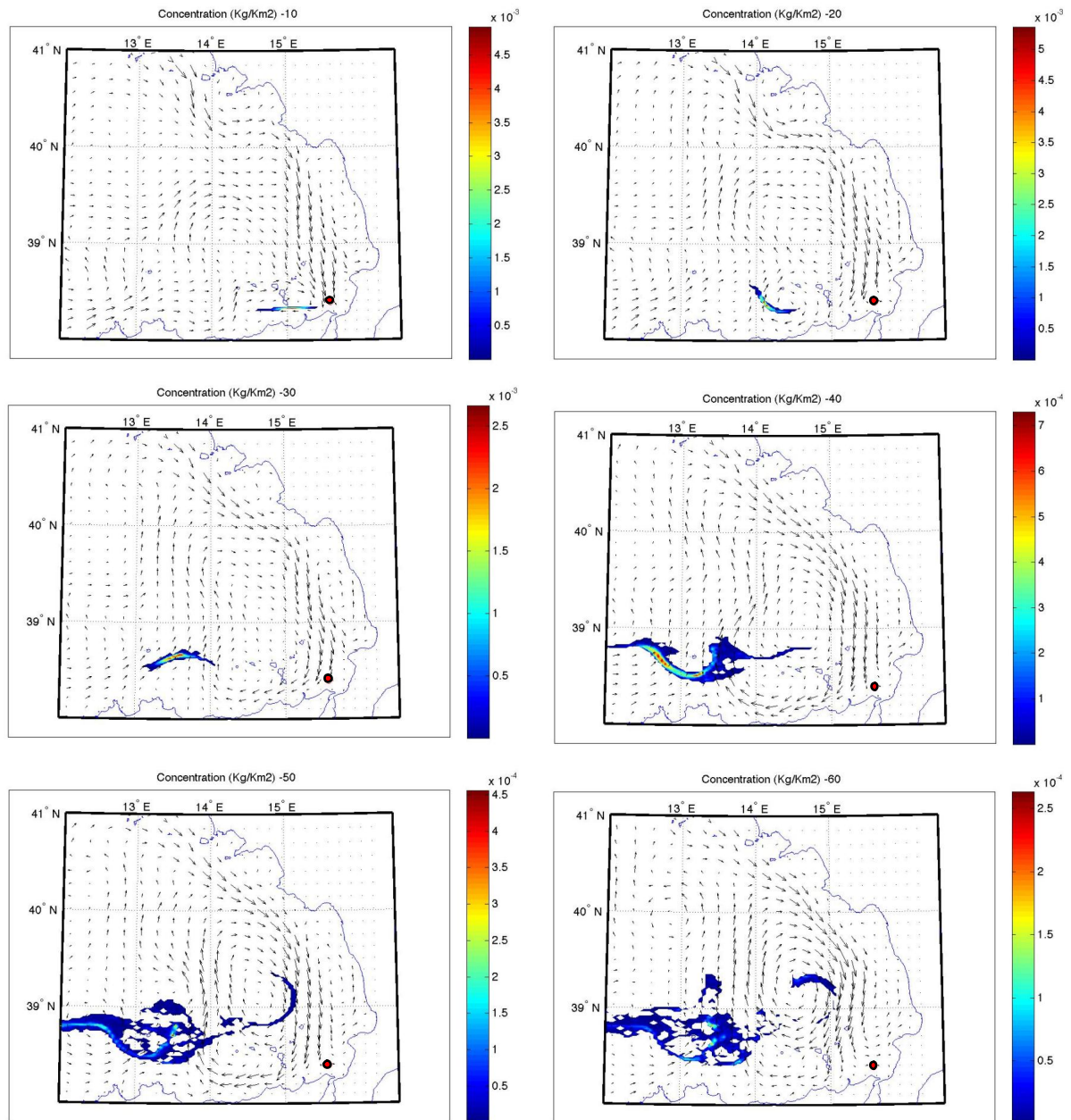
in un punto A del dominio avente coordinate:

- Latitudine: 38° 40' 00"
- Longitudine: 15° 57' 00"



#### 4.2.1 Vento prevalente da nord

Nel primo caso è stata osservata la dispersione di petrolio in un periodo in cui il vento ha mostrato da una provenienza prevalentemente settentrionale.



**Figura 12 – Dispersione di inquinante nel piano orizzontale dopo 5, 10, 15, 20, 25, 30 giorni di simulazione nel caso di venti settentrionali**

La figura 12 mostra l'evoluzione nel tempo della dispersione orizzontale di inquinante, rispettivamente dopo 5, 10, 15, 20, 25 e 30 giorni di simulazione.

L'inquinante emesso in condizioni di vento proveniente prevalentemente dal nord, segue principalmente la circolazione generale del bacino, e viene portato verso ovest.

Dopo i primi 5 giorni di simulazione l'inquinante non si è discostato molto dal punto di sversamento e si presenta sotto forma di una chiazza di petrolio ancora coesiva e poco dispersa fino al quindicesimo giorno di simulazione.

La dispersione inizia in maniera più sostanziale a 20 giorni di simulazione; il contaminante tende ad essere trasportato nella zona ovest del bacino, fino ad arrivare, dopo il venticinquesimo giorno, in prossimità del Canale di Sardegna.

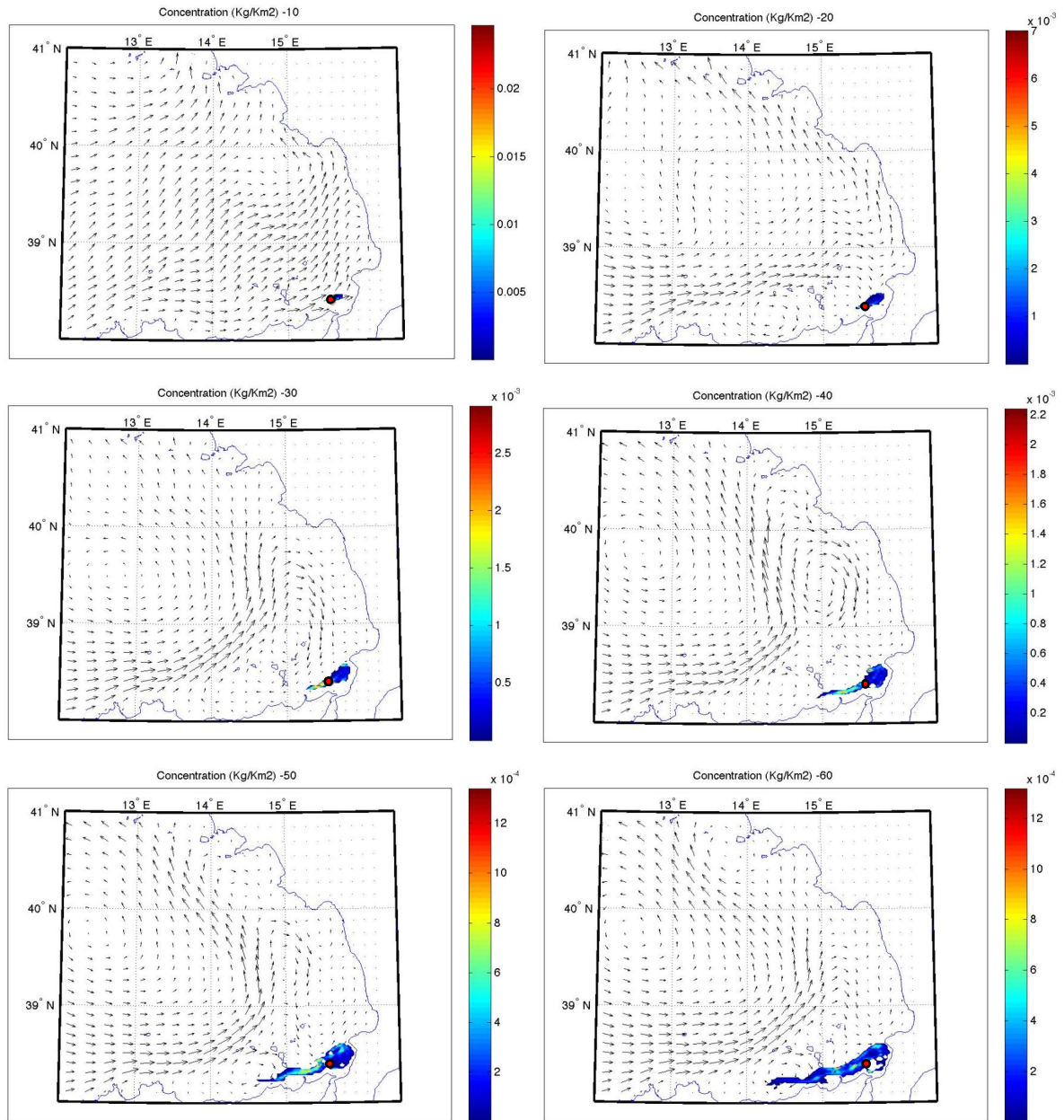
Si osserva inoltre che solo una piccola parte di contaminante tende a risalire verso nord, ad ovest della costa calabrese.

Dopo 30 giorni di simulazione la dispersione dell'inquinante è notevole e gran parte di esso si rinviene nella zona ovest del bacino.

In tali condizioni le coste non sono esposte ad un elevato rischio di contatto in quanto l'inquinante tende ad essere spinto lontano dalla costa dalle correnti, a loro volta influenzate dall'andamento del vento.

#### 4.2.2 Vento prevalente da sud

Il secondo caso analizzato riguarda la dispersione di petrolio nell'eventualità in cui il vento ha una provenienza prevalentemente meridionale.



**Figura 13** Concentrazioni di inquinante nel piano orizzontale dopo 5, 10, 15, 20, 25, 30 giorni di simulazione nel caso di venti meridionali

In figura 13 in cui si può osservare l'evoluzione temporale della dispersione orizzontale di petrolio rispettivamente dopo 5, 10, 15, 20, 25 e 30 giorni di simulazione.

In condizioni di vento proveniente prevalentemente dal settore sud, l'inquinante permane nella parte meridionale del bacino tirrenico, in prossimità della costa siciliana, determinando una condizione notevolmente diversa da quella in cui il vento proviene dal settore nord.

Si viene a determinare quindi un evento estremamente gravoso per la costa settentrionale della Sicilia, a causa delle zone di ricircolo che vengono a formarsi in prossimità dello Stretto di Messina.

Come si osserva dalla figura 13 l'inquinante permane nella zona in cui avviene il rilascio fino a 15 giorni di simulazione dopodiché esso comincia a disperdersi e a lambire la costa settentrionale della Sicilia.

#### **4.3 Influenza del posizionamento della sorgente**

Un'ulteriore studio è stato rivolto all'ubicazione del punto di rilascio dell'inquinante; in particolare è stata condotta un'analisi di sensibilità per quanto concerne il posizionamento della sorgente a parità di condizioni di vento.

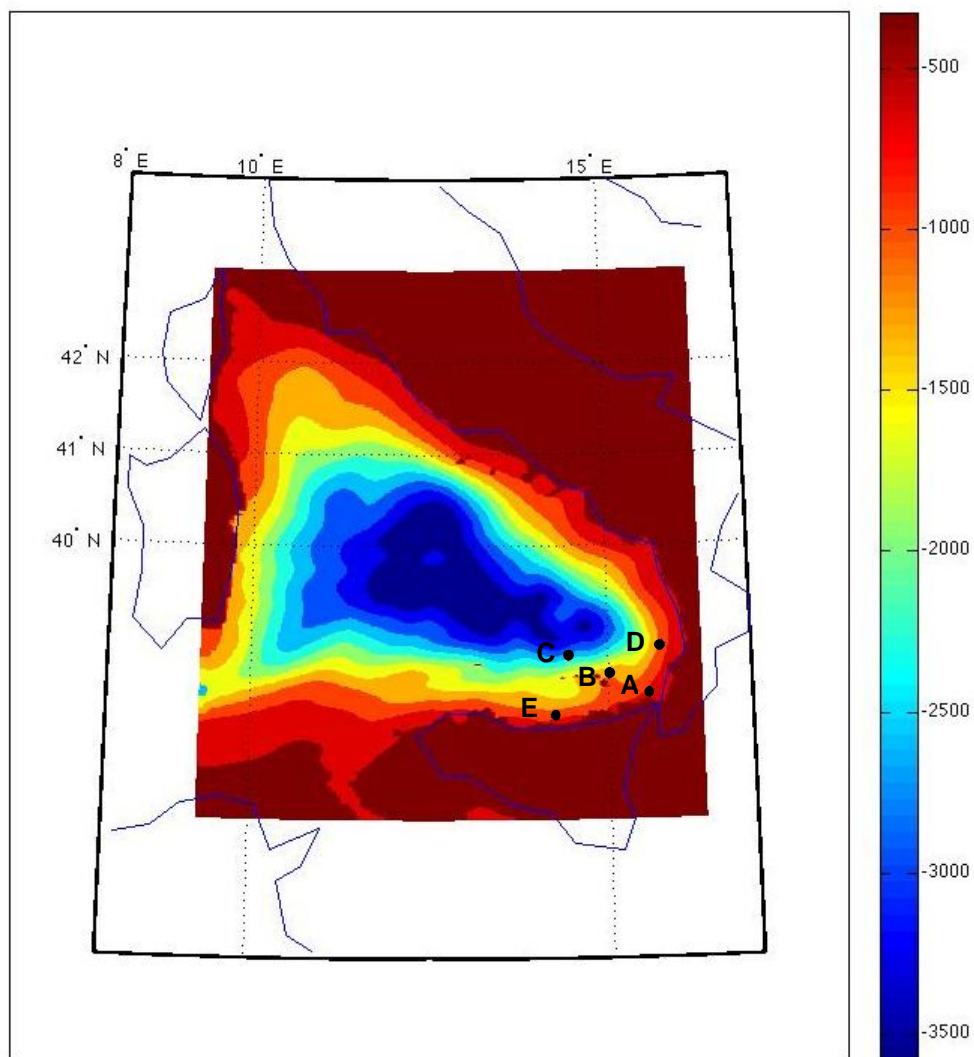
I cinque punti di sversamento considerati sono riportati in tabella 14.

<b>SORGENTE</b>	<b>Latitudine</b>	<b>Longitudine</b>
<b>A</b>	38°40'00"	15°57'00"
<b>B</b>	38°60'00"	15°00'00"
<b>C</b>	38°80'00"	14°45'00"
<b>D</b>	38°90'00"	15°75'00"
<b>E</b>	38°15'00"	14°25'00"

**Tabella 14 – Coordinate dei punti di emissione di inquinante**

I punti di sversamento osservabili in figura 14 sono stati selezionati in modo tale da tener conto di alcuni eventi possibili: i punti A, B e C sono posizionati all'incirca lungo una retta, possibile rotta petrolifera. Inoltre è stata valutata la dispersione nel caso di emissione in prossimità della costa ovvero nei punti A, D ed E.

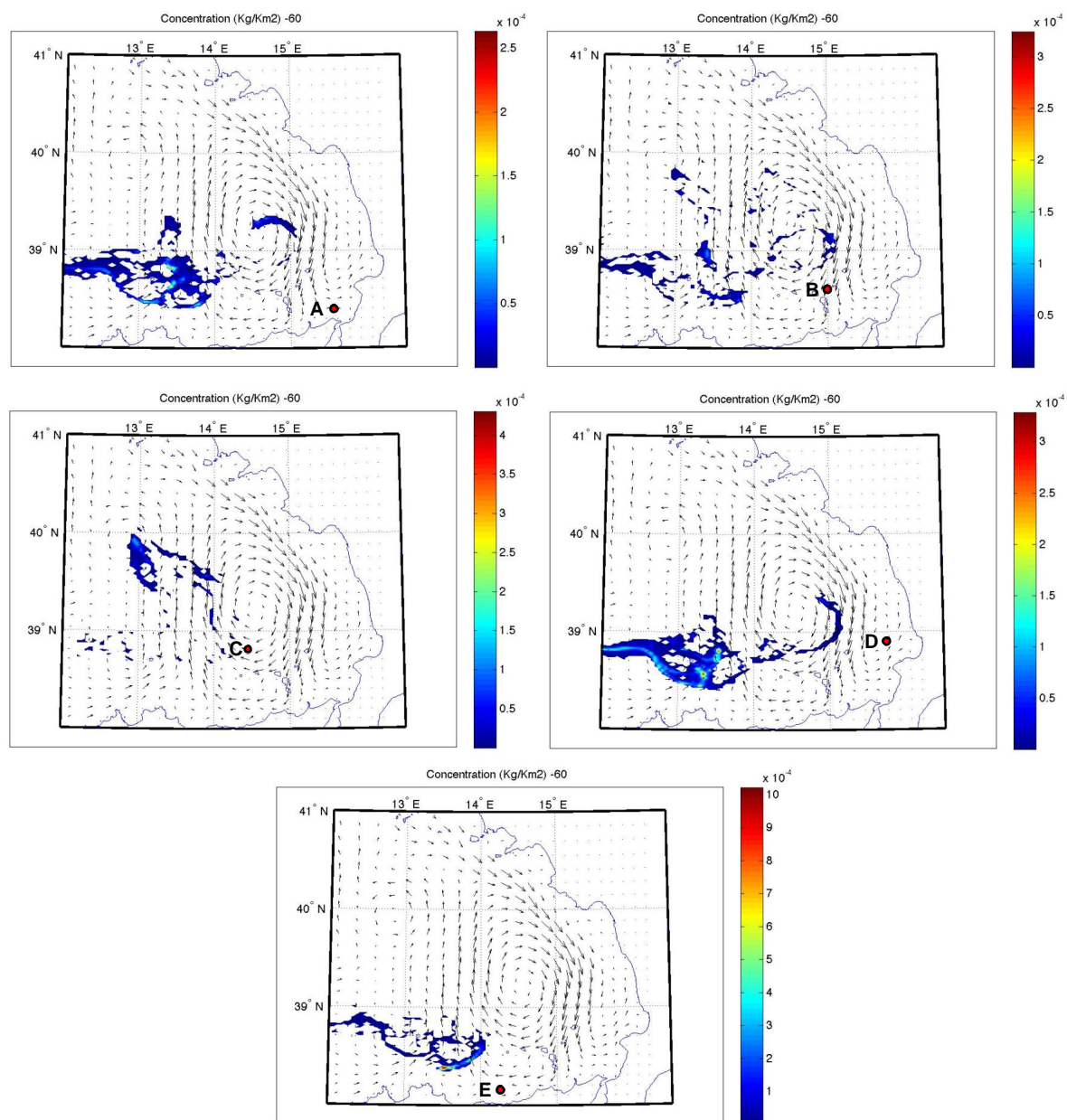




**Figura 14 – Ubicazione dei punti di emissione di inquinante**

#### **4.3.1 Vento prevalente da nord**

Nel caso in cui il vento proviene dal settore settentrionale si ottengono i risultati riportati in figura 15 in cui è possibile osservare la dispersione orizzontale di petrolio dopo 30 giorni di simulazione per ciascun punto di rilascio di inquinante.



**Figura 15 – Dispersione di petrolio nel piano orizzontale dopo 30 giorni di simulazione con sversamento nei punti A, B, C, D, E nel caso di venti settentrionali**

In tutti i casi esaminati, con direzione del vento prevalente da nord, l'inquinante segue il campo idrodinamico che si genera e viene trasportato verso ovest a causa del ricircolo anticiclonico che si forma nella parte meridionale del bacino Tirrenico.

Nel caso in cui lo sversamento avviene in prossimità della costa l'inquinante sarà soggetto ad una dispersione minore rispetto ai casi in cui la sorgente viene a trovarsi nelle zone più interne del bacino.

In queste condizioni di vento il gyre anticiclonico che viene a formarsi nel Tirreno meridionale tende a disperdere l'inquinante soprattutto nei casi in cui la sorgente è posizionata nei punti B e C. In queste condizioni infatti, l'inquinante viene a trovarsi all'interno del gyre anticiclonico determinando una dispersione maggiore rispetto ai casi in cui la sorgente è posizionata in prossimità della costa, come nel caso dei punti A, D ed E.

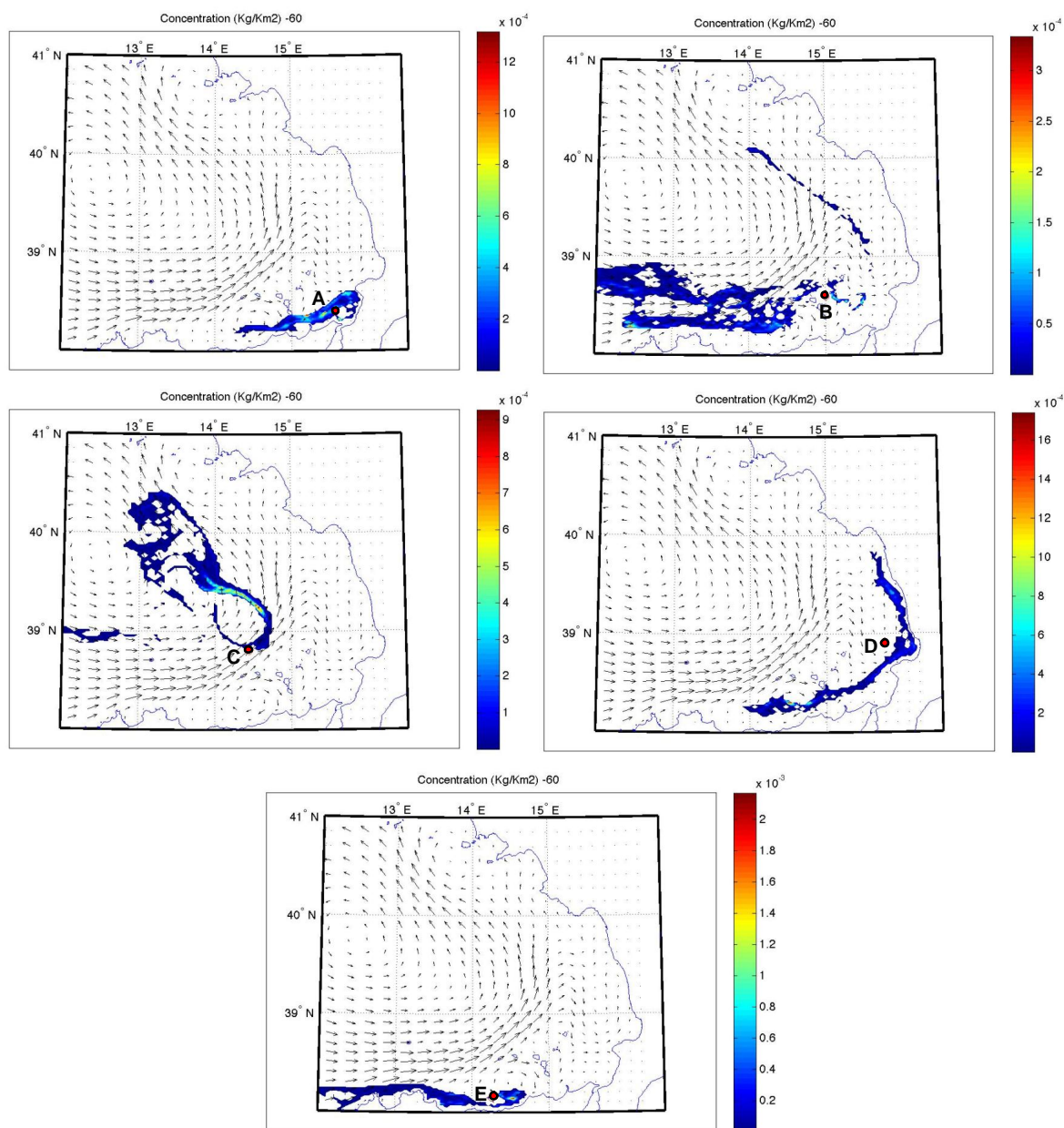
Già dal ventesimo giorno di simulazione la corrente "straccia" la chiazza di petrolio in piccole zone nei casi di sorgente ubicata nei punti B e C, e l'inquinante è completamente disperso dopo 30 giorni di simulazione.

Nei casi di rilascio di petrolio dai punti A e D, la chiazza tende ad allargarsi e a propagarsi presentandosi ancora coesa e poco dispersa anche dopo 30 giorni di simulazione.

In tutti i casi, anche se in concentrazioni diverse, l'inquinante tende ad essere trasportato nella zona ovest del Tirreno.

#### **4.3.2 Vento prevalente da sud**

Nel caso in cui il vento proviene dal settore sud, si ottengono i risultati riportati in figura 16 in cui è possibile osservare la dispersione orizzontale di petrolio e dopo 30 giorni di simulazione per ciascun punto di rilascio di inquinante.



**Figura 16 – Dispersione di petrolio nel piano orizzontale dopo 30 giorni di simulazione con sversamento nei punti A, B, C, D, E nel caso di venti meridionali**

Le direzioni di dispersione risultanti da queste ultime simulazioni sono in accordo con la circolazione generale del bacino, a sua volta influenzata dalla direzione di provenienza del vento.

L'inquinante emesso in prossimità della costa, come mostrano i casi A, D ed E, tende a permanere in prossimità del punto di rilascio e ad invadere il litorale adiacente, andando a determinare condizioni estremamente gravose per l'area costiera.

Nel caso di rilascio nel punto A, il petrolio persiste in prossimità dello Stretto di Messina; in caso di emissione nel punto D, il contaminante tende a lambire parte della costa calabra a nord del punto di emissione, e in parte viene trasportato verso sud, fino ad arrivare alla costa settentrionale della Sicilia. Quest'ultima viene completamente invasa nel caso di sversamento nel punto E, determinando condizioni estremamente gravose per l'intero litorale interessato.

Nei casi in cui la sorgente viene a trovarsi nei punti più interni del bacino tirrenico, l'inquinante tende ad essere trasportato dalla corrente in direzione nord, seguendo il vortice ciclonico della circolazione generale.

#### **4.4 Aree a rischio del Tirreno meridionale**

L'obiettivo del presente lavoro è stato quello di stabilire quali possano essere le aree costiere maggiormente esposte a rischio di contatto da parte di materiale oleoso con densità minore dell'acqua marina, assimilabile al petrolio, a seguito di rilascio accidentale in prossimità del Tirreno meridionale, senza tener conto dei processi di degradazione a cui l'inquinante va incontro a media e lunga scala temporale.

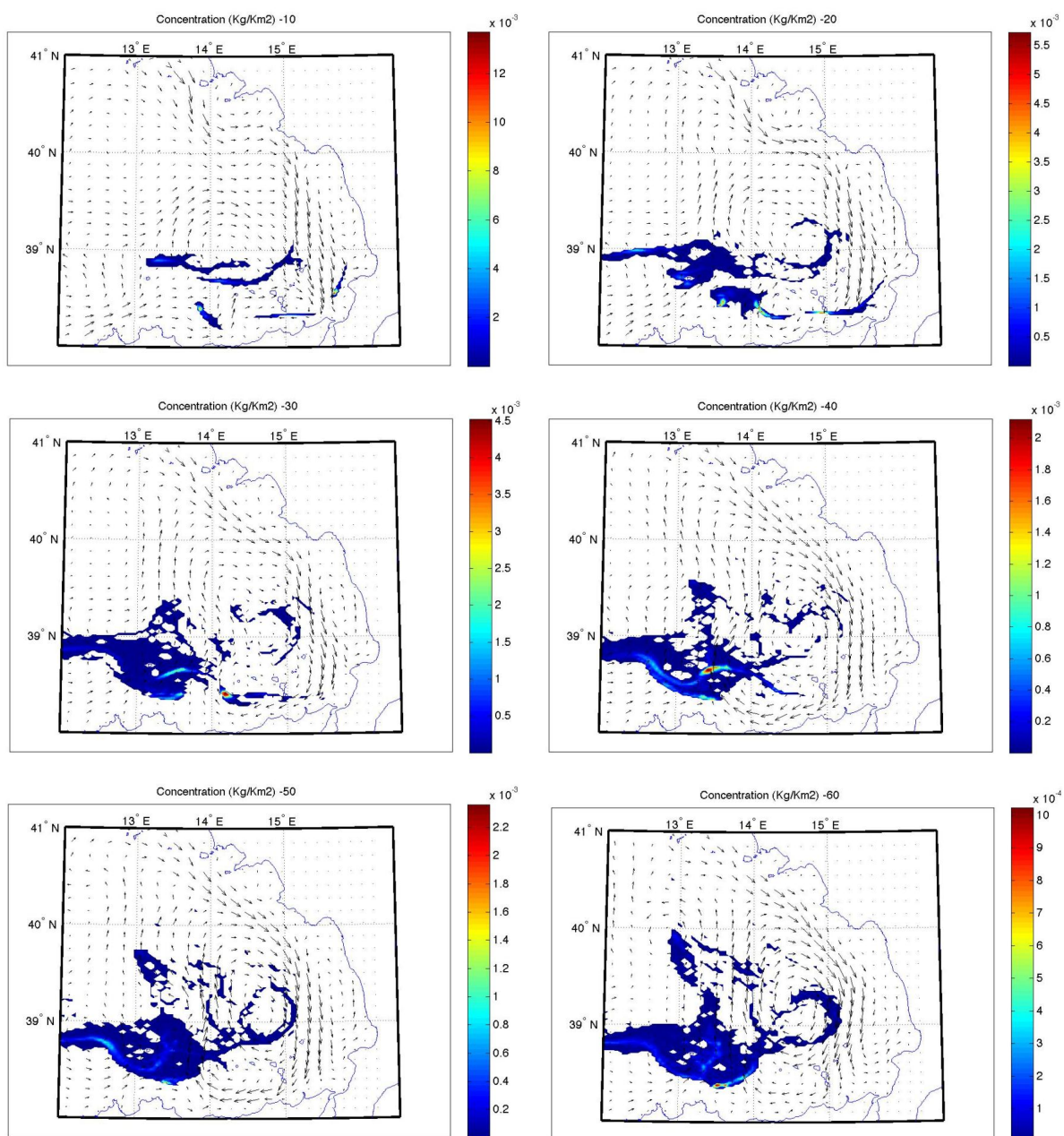
In tutte le simulazioni di oil spill la dispersione è stata influenzata notevolmente dal campo idrodinamico, riprodotto per le diverse situazioni meteorologiche, che condizionano in modo sostanziale la circolazione generale del bacino.

##### **4.4.1 Dispersione simultanea di inquinante**

Nelle figure 17 e 18 viene rappresentata la dispersione orizzontale di contaminante con rilascio simultaneo da più punti, in modo tale da poter osservare le aree maggiormente esposte a rischio di contaminazione rispettivamente dopo 5, 10, 15, 20, 25 e 30 giorni di simulazione.

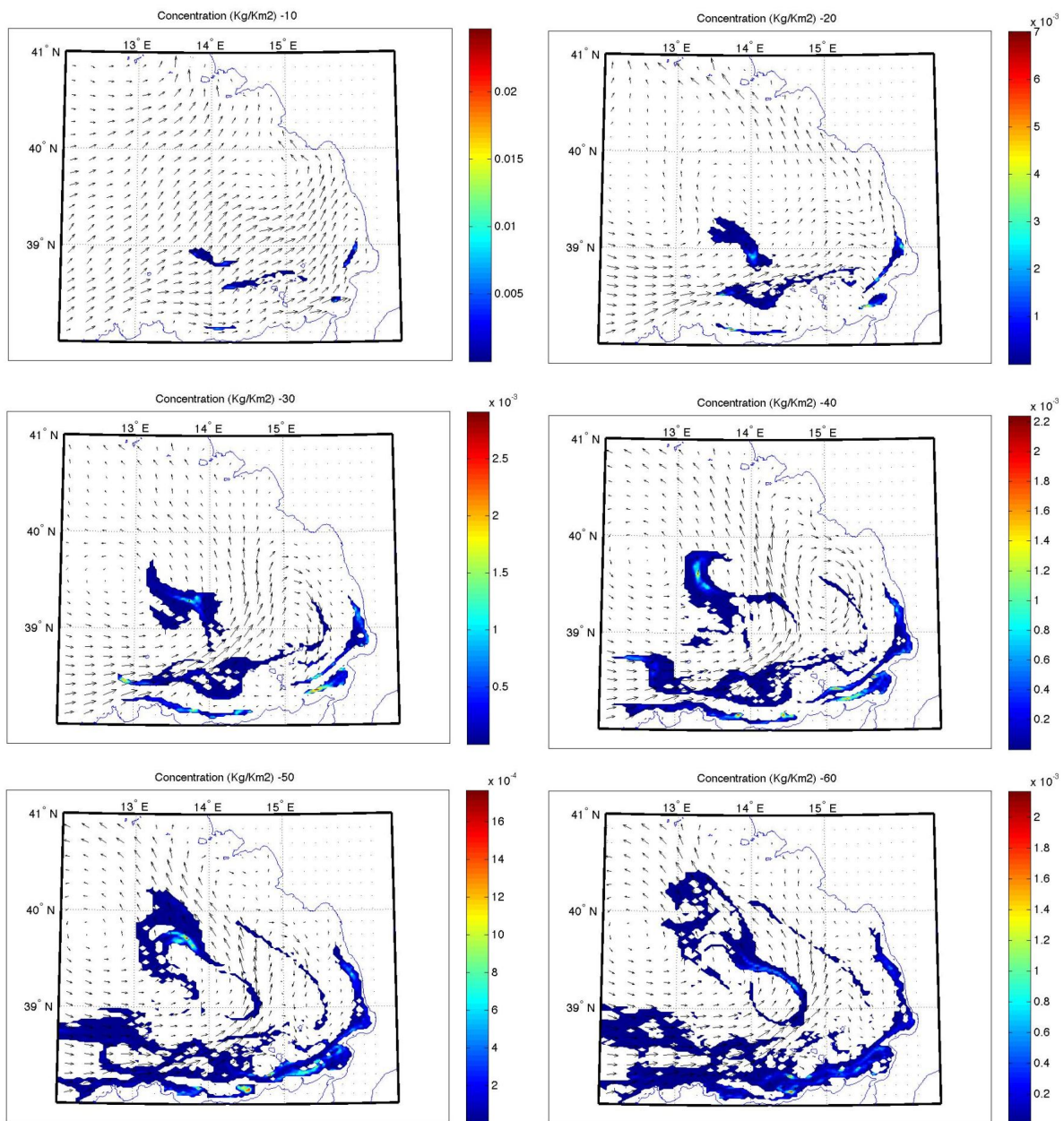
In figura 17 viene riportata la dispersione orizzontale nel caso in cui il vento proviene prevalentemente dal settore nord. L'inquinante tende ad essere trasportato nella zona ovest del bacino e si rinviene in prossimità della costa soltanto nei primi giorni conseguenti al rilascio; già dopo il quindicesimo giorno di simulazione l'inquinante viene trasportato dalle correnti verso occidente.

Nella figura 18 si può osservare la dispersione di inquinante a seguito di rilascio simultaneo da più sorgenti, nel caso in cui la provenienza del vento è prevalentemente meridionale. In questo caso l'inquinante non viene allontanato dalla costa ma permane in prossimità del punto di rilascio, determinando un alto rischio per il litorale della Sicilia settentrionale e parte della costa calabra.



**Figura 17 – Dispersione di inquinante nel piano orizzontale a seguito di rilascio simultaneo dopo 5, 10, 15, 20, 25 e 30 giorni di simulazione nel caso di venti settentrionali**





**Figura 18 – Dispersione di inquinante nel piano orizzontale a seguito di rilascio simultaneo dopo 5, 10, 15, 20, 25 e 30 giorni di simulazione nel caso di venti meridionali**



#### 4.4.2 Discussione dei risultati

Nelle figure 19 e 20 sono rappresentate le concentrazioni totali di inquinante derivanti dalla somma delle concentrazioni ottenute per ogni time step, nel caso di sversamenti in diversi punti del Tirreno meridionale, per le due condizioni di vento tipiche dell'area in esame.

Per ogni punto di sversamento sono state rilasciate 8,10 kg/s di inquinante, per un totale di 700 tonnellate, emesse in modo continuo per 24 ore a 2 metri di profondità.

Come si osserva dalle figure 19 e 20 la concentrazione di petrolio risulta maggiore in corrispondenza del punto di rilascio, e tende a diminuire man mano che ci si allontana da questa.

Nel caso di vento proveniente prevalentemente dal settore nord l'inquinante tende a propagarsi verso ovest, allontanandosi quindi dalla costa della Sicilia settentrionale e portandosi verso il canale di Sardegna. Il tratto di costa esposto a rischio si estende da Tropea fino a Milazzo per un tratto pari a circa 150 km.

Dal secondo caso, rappresentato in figura 20, in cui il campo idrodinamico è stato forzato con un vento proveniente prevalentemente dal settore meridionale, emerge che il contaminante tende a lambire un tratto di costa di circa 585 km, interessando sia parte del litorale calabro che l'intera area settentrionale della Sicilia, rendendo tale situazione estremamente più gravosa della precedente.

I rilasci accidentali in prossimità della costa sono di gran lunga più pericolosi di quelli che avvengono in mare aperto, soprattutto nel caso in cui si presentino le condizioni di vento utilizzate per il secondo caso.

Dall'analisi statistica dei dati di vento dei mesi invernali per le stazioni di Messina e Reggio Calabria, relativa al quinquennio 2005-2009 ed illustrata nel capitolo 2, è emerso che la direzione di provenienza prevalente è quella settentrionale, la cui frequenza è pari a 49,48% per la stazione di Messina ed al 39,03% per la stazione di Reggio Calabria.

Il vento proveniente dal settore sud si manifesta con una frequenza del 30,32% per la stazione di Messina, e del 15,64% per la stazione di Reggio Calabria. Quest'ultima condizione, sebbene si manifesti con una frequenza minore, è di importanza non trascurabile, considerando gli effetti che può produrre sulla dispersione di inquinante.

L'area costiera che viene a contatto con il contaminante è di gran lunga maggiore nel caso in cui il vento provenga dal settore sud; il tratto interessato è, infatti, circa quattro volte maggiore di quello coinvolto nel caso in cui il vento giunga dal nord.

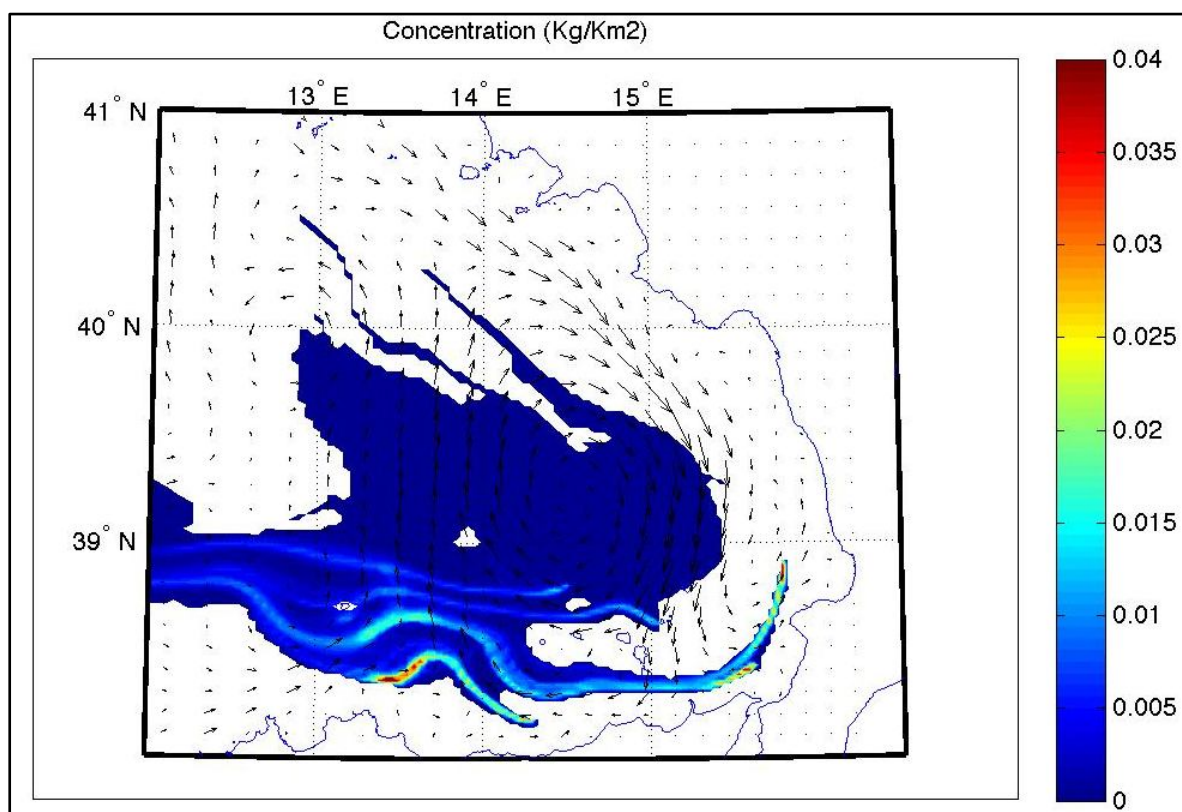


Figura 19 – Concentrazione totale di inquinante nel caso di venti settentrionali

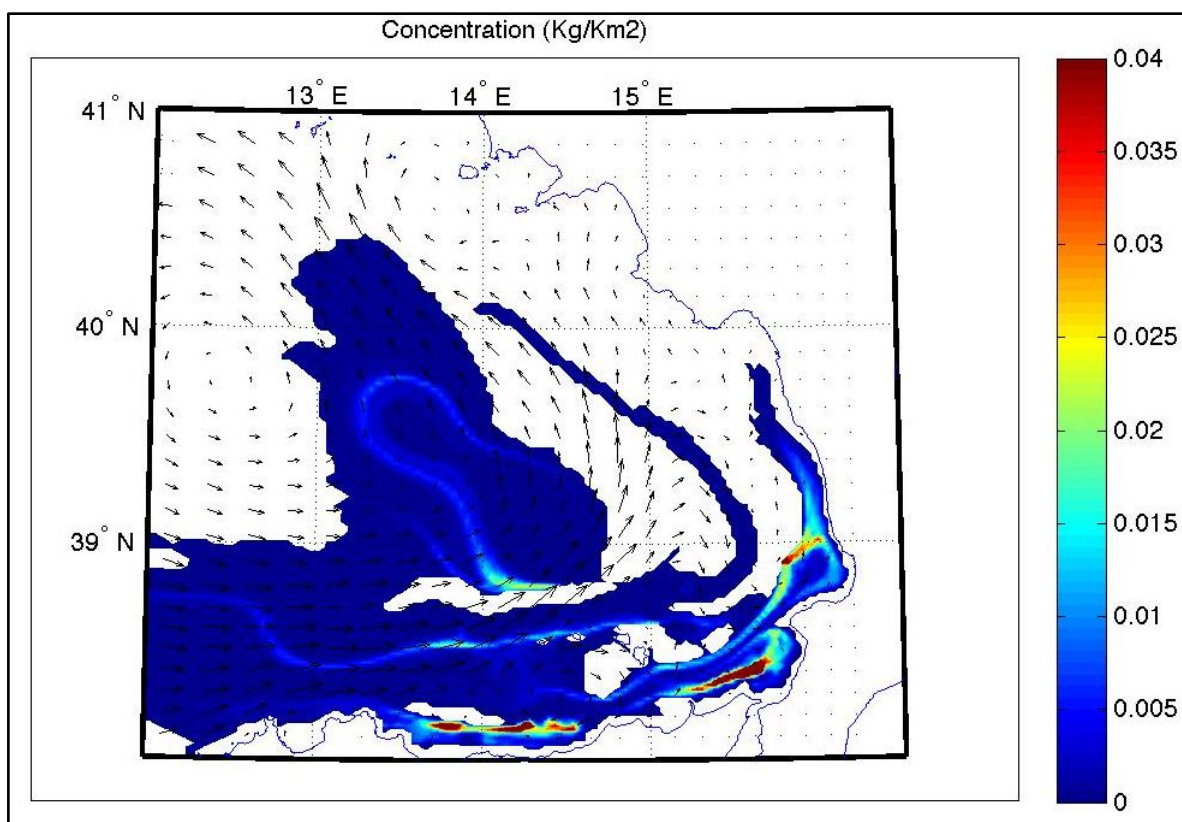


Figura 20 – Concentrazione totale di inquinante nel caso di venti meridionali

## 5 CONCLUSIONI

L'utilizzo di un sistema di modelli numerici accoppiato, caratterizzato dal modello di circolazione marina *POM* (*Princeton Ocean Model*) e dal modello di dispersione lagrangiano *LAWAM* (*LAgrangian WAter Model*), ha permesso di esaminare la circolazione generale del bacino tirrenico in determinate condizioni meteorologiche e, successivamente, di stabilire la dispersione e il trasporto di una sostanza avente una velocità di sedimentazione pari a 0,0001 m/s, assimilabile ad un olio leggero con densità minore dell'acqua marina, senza tener conto dei processi di degradazione dell'inquinante e delle variazioni di densità che avvengono a media e lunga scala temporale.

Prima di avviare le simulazioni modellistiche che hanno consentito di descrivere quantitativamente lo stato e l'evoluzione del sistema a breve termine, è stato opportuno acquisire una conoscenza accurata della circolazione marina e delle forzanti meteorologiche dell'area in esame.

Il campo idrodinamico generato dalla fase di spin-up dopo 120 giorni di simulazione è stato utilizzato come condizione iniziale per effettuare un run di 30 giorni con un campo di vento ogni 24 ore relativo al periodo in esame.

Il campo idrodinamico generato è stato posto in ingresso per le applicazioni del modello di dispersione lagrangiano *LAWAM*. Tale modello utilizza come input un file in uscita dal *POM* contenente le informazioni relative all'evoluzione delle correnti nel bacino. Il *LAWAM*, in funzione di questo campo idrodinamico simula la dispersione di inquinanti, il cui comportamento può essere assimilato a traccianti passivi.

Per ciascun intervallo temporale selezionato, della durata di un mese, in cui è stata rilevata una direzione prevalente di provenienza del vento, in grado quindi di rappresentare le due situazioni di vento tipiche dell'area in esame, è stato riprodotto un campo idrodinamico con dati di vento giornalieri, a seguito dei quali si è provveduto ad avviare le simulazioni di oil spill.

In tal modo è stata stabilita l'influenza della provenienza del vento in primo luogo sul campo idrodinamico del bacino tirrenico e, in modo indiretto, sulla dispersione di inquinante a parità di punto di sversamento.

Inoltre è stata valutata l'influenza del posizionamento della sorgente sulla dispersione a parità di condizioni di vento. La scelta dei punti in cui effettuare i rilasci è stata fatta in modo tale da porre l'attenzione sulle zone più a rischio del Tirreno meridionale, interessate da intenso traffico petrolifero.

Gli incidenti sono stati simulati ipotizzando uno sversamento di 8,10 kg/s di inquinante passivo a bassa densità emesso in modo continuo per 24 ore, per un totale di 700 tonnellate, a 2 metri di profondità.

I risultati delle simulazioni mostrano che la dispersione orizzontale dell'inquinante segue principalmente la circolazione generale del bacino, fortemente influenzata dalla direzione del vento.

L'inquinante emesso in condizioni di vento proveniente prevalentemente dal nord tende ad essere trasportato nella zona ovest del bacino, fino ad arrivare, dopo il venticinquesimo giorno, in prossimità del Canale di Sardegna.

In condizioni di vento proveniente prevalentemente dal settore sud, l'inquinante permane nella parte meridionale del bacino tirrenico, in prossimità della costa siciliana, determinando una condizione notevolmente diversa da quella in cui il vento proviene dal settore nord ed estremamente gravosa per la costa settentrionale della Sicilia.

Un ulteriore studio è stato rivolto all'ubicazione del punto di rilascio dell'inquinante; in particolare è stata condotta un'analisi di sensibilità per quanto concerne il posizionamento della sorgente a parità di condizioni di vento.

In tutti i casi esaminati, con direzione del vento prevalente da nord, l'inquinante segue la circolazione generale e viene trasportato verso ovest. Nel caso in cui lo sversamento avvenga in prossimità della costa l'inquinante sarà soggetto ad una dispersione minore rispetto ai casi in cui la sorgente viene a trovarsi nelle zone più interne del bacino.

Nella condizione di vento proveniente prevalentemente dal settore sud, l'inquinante emesso in prossimità della costa tende a permanere in prossimità del punto di rilascio e ad invadere il litorale adiacente, andando a determinare condizioni assai gravose per l'area costiera.

Al termine del lavoro è stato possibile stabilire quali possano essere le aree costiere maggiormente esposte a rischio di contatto da parte di materiale oleoso a seguito di rilascio accidentale in prossimità del Tirreno meridionale.

L'area costiera che potrebbe venire a contatto con il contaminante è di gran lunga maggiore nel caso in cui il vento provenga dal settore sud; il tratto interessato è, infatti, circa quattro volte più esteso di quello coinvolto nel caso in cui il vento giunga dal nord.

Si può in conclusione affermare che l'approccio modellistico POM-LAWAM utilizzato nel presente studio sembra fornire un valido strumento nella previsione della dispersione di inquinanti negli studi di impatto ambientale in seguito ad eventi accidentali, come ad

esempio sversamenti di petrolio ed è in grado di fornire previsioni in tempo reale conseguenti al rilascio accidentale di materiale oleoso.

In caso di incidenti in mare, tale sistema permette di indirizzare gli interventi di mitigazione dei danni verso le aree maggiormente esposte al rischio di contaminazione.

Tuttavia, per quanto riguarda la dispersione dell'inquinamento, si prevede un sempre maggiore supporto dai sistemi satellitari per una stima qualitativa, in tempo reale, della dispersione del plume inquinato sulla superficie marina; inoltre essi risulterebbero utili in fase di confronto a posteriori con i risultati delle modellazioni numeriche di dispersione

## ***Bibliografia***

- Artale, V., Astraldi, M., Buffoni, G., Gasparini, G. P., Seasonal variability of gyre-scale circulation in the northern Tyrrhenian Sea, *Journal of geophysical research*, V. 99, NO. C7, 14,127-14,137, 1994.
- Astraldi, M., Gasparini, G. P., The Seasonal Characteristics of the Circulation in the North Mediterranean Basin and Their Relationship With the Atmospheric-Climatic Condition, *Journal of geophysical research*, V. 97, NO. C6, 9531-9540, 1991.
- Béranger, K., Mortier, L., Gasparini, G. P., Gervasio, L., Astraldi, M., Crépon, M., The dynamics of the Sicily Strait: a comprehensive study from observations and models, *Deep-Sea research Part II*, V. 51, 411-440, 2004.
- Blumberg, A.F., Mellor, G. L., A Description of a Three-Dimensional Coastal Ocean Circulation Model, Three-Dimensional Coastal Ocean Models, Coastal and Estuarine Sciences, N. S. Heaps, (Ed.), American Geophysical Union, Washington, D.C., V. 4, 1-16, 1987.
- Buffoni, G., Falco, P., Griffa, A., Zambianchi, E., Dispersion processes and residence times in a semi-enclosed basin with recirculating gyres: An application to the Tyrrhenian Sea, *Journal of geophysical research*, V. 102, N O. C8, 18,699-18,713, 1997.
- Castellari, S., Pinardi, N., Leaman, K., A model study of air–sea interactions in the Mediterranean Sea, *Journal of Marine Systems*, V. 18, 89-114, 1998.
- Gasparini, G. Schröder, K., Vetrano, A., Astraldi, M., Canali e stretti quali punti di osservazione privilegiata per lo studio della variabilità interannuale nel bacino Mediterraneo, *Istituto di Scienze Marine, CNR*, 2007.
- ISPRA, Analisi dei venti in Puglia dal 1992 al 1994, febbraio 2003.
- Kocak, K., Practical ways of evaluating wind speed persistence, *Energy*, V. 33, 65-70, 2008.
- Leuzzi, G., Dispense del corso “Meccanica dei Fluidi”; Dispense del corso “Modelli numerici per lo studio dei fenomeni di inquinamento”.
- Leuzzi, G., Monti, P., Particle trajectory simulation of dispersion around a building, *Atmospheric Environment*, 32, 203-214, 1998.

- Leuzzi, G., Monti, P., The Coupling of POM with a Lagrangian, First Order, Autoregressive Dispersion Model, *Fifth International Symposium on Environmental Hydraulics*, (ISEH V), Arizona State University, 4-7 December 2007.
- Mellor, G.L., Users Guide for a Three-Dimensional, Primitive Equation, Numerical Ocean Model, 2004.
- Mellor, G.L., Oey, L.Y. and Ezer, T. , Sigma coordinate pressure gradient errors and the seamount problem, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, V. 15, 1122-1131, 1998.
- Millot, C., Circulation in the Western Mediterranean Sea, *Journal of Marine Systems*, V. 20, 423-442, 1999.
- Millot, C., Taupier-Letage I., Circulation in the Mediterranean Sea, *The Handbook of Environmental Chemistry*, Vol. 1 (*The Natural Environment and the Biological Cycles*), Springer-Verlag Editor, 2004.
- Monti, P., Leuzzi, G., Un modello lagrangiano per la stima della dispersione di inquinanti nel mar Tirreno, *Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*, 2008.
- Monti, P., Leuzzi, G., A closure to derive a three-dimensional well-mixed trajectory model for non-Gaussian, inhomogeneous turbulence, *Boundary-Layer Meteorology*, 80, 311-331, 1996.
- Pierini, S., Simioli, A., A wind-driven circulation model of the Tyrrhenian Sea area, *Journal of Marine Systems*, V. 18, 161-178, 1998.
- Pierini, S., Rubino, A., Modeling the Oceanic Circulation in the Area of the Strait of Sicily: The Remotely Forced Dynamics, *Journal of physical oceanography*, V. 31, 1397-1409, 2001.
- REMPEC, (Regional Marine Pollution Emergency Response Centre for the Mediterranean Sea), Study of Maritime Traffic Flow in the Mediterranean Sea, July 2008.
- REMPEC, (Regional Marine Pollution Emergency Response Centre for the Mediterranean Sea), list of alerts and accidents in the Mediterranean, *Regional information system / Part C / section 2*, 2004

- Serraval, R., Cristofalo G.C., On the presence of a costal current of Levantine intermediate water in the central Thyrrenian Sea, *Oceanologic Acta*, Vol. 22, N°3, pag. 281-290, 1999.
- Sorgente R, Drago A. F., Ribotti, A., Seasonal variability in the Central Mediterranean Sea circulation, *Annales Geophysicae*, Vol. 21, pag. 299-322, 2003.
- Thomson, D.J., Criteria for the selection of stochastic models of particle trajectories in turbulent flows, *Journal of Fluid Mechanics*, 180, 529-556, 1987.
- Vetrano, A., Gasparini, G.P., Molcard, R., Astraldi, M., Water flux estimates in the Central Mediterranean Sea from an inverse box model, *Journal of Geophysics Research*, Vol. 109, C010119, doi:10.1029/2003JC001903, 2004.