

ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITA' DI BOLOGNA

FACOLTA' DI SCIENZE MATEMATICHE FISICHE E NATURALI

Corso di laurea in SCIENZE AMBIENTALI

**Studio del rischio da versamenti di  
inquinanti da navi:  
il caso dell'Adriatico**

Tesi di laurea in OCEANOGRAFIA E DINAMICA DELLA ZONA COSTIERA

Relatore

Prof.ssa Nadia Pinardi

Presentata da

Giorgia Fantini

Correlatore

Michela De Dominicis

II sessione

Anno Accademico 2011/2012



# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>3</b>
1.1	Inquinamento da Idrocarburi . . . . .	5
1.1.1	Trasporto petrolifero nel Mediterraneo . . . . .	6
1.1.2	Caratteristiche degli idrocarburi in acqua . . . . .	11
1.1.3	Cause di versamenti, impatti sull'ambiente e ripristino	18
1.1.4	Area di studio: Mar Adriatico . . . . .	24
1.2	Rischio e pericolosità . . . . .	27
1.2.1	Analisi di pericolosità . . . . .	27
1.3	Obiettivo della tesi . . . . .	29
<b>2</b>	<b>Dati e Metodi</b>	<b>31</b>
2.1	Sistema di previsione dello spostamento e trasformazione degli idrocarburi in mare . . . . .	31
2.1.1	MFS e AFS: modelli di previsione di corrente . . . . .	31
2.1.2	Modello di previsione del trasporto e trasformazione degli idrocarburi in mare MEDSLIK II . . . . .	33
2.2	Esperimento di simulazione di dispersione di idrocarburi a mare	38
2.2.1	Descrizione del disegno sperimentale . . . . .	38
<b>3</b>	<b>Risultati</b>	<b>45</b>
3.1	Mappe di Pericolosità . . . . .	45
<b>4</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>55</b>
<b>5</b>	<b>Bibliografia</b>	<b>56</b>



## Capitolo 1

### 1 Introduzione

Il petrolio, fin dalla sua prima comparsa, ha rappresentato una fonte indispensabile di energia per l'uomo e per le sue attività. Immediatamente dopo la costruzione del primo pozzo petrolifero, nel 1859 in Pennsylvania, iniziarono i primi trasporti di greggio via mare. Sebbene il petrolio non godesse di una buona reputazione fin dai primi tempi, iniziò a essere sempre più trasportato e utilizzato, fino ad acquistare l'importanza indispensabile che tuttora ha. A livello mondiale il petrolio è la merce maggiormente trasportata via mare.

Le vie principali sono quelle che vanno dai paesi produttori: Medio Oriente, Golfo Persico, Nord Africa e Caraibi, verso Europa, Asia e America. In genere, sono trasportati via mare circa il 60% del totale degli idrocarburi che utilizziamo per le attività umane (Legambiente, 2010). L'Europa rappresenta il maggiore importatore mondiale di petrolio e il Mediterraneo uno dei mari maggiormente solcati da navi, in esso transita infatti il 30% del trasporto internazionale (Legambiente, 2010).

Il Mediterraneo rappresenta in questo modo uno dei bacini più inquinati a causa anche della sua conformazione. Esso è infatti un bacino semichiuso i cui unici sbocchi con gli altri mari sono rappresentati dallo stretto di Gibilterra, che lo collega con l'Oceano Atlantico, e dal canale di Suez, che lo collega al Mar Rosso oltre allo stretto di Canakkale che lo collega al mar Nero.

Il trasporto marittimo di petrolio avviene però spesso non rispettando le normative vigenti sulla sicurezza. E' infatti molto difficile stabilire con esattezza il quantitativo di petrolio che ogni anno viene disperso in mare in quanto esso non dipende solamente dal verificarsi di incidenti, bensì anche da una parte che viene rilasciata illegalmente durante operazioni di lavaggio delle cisterne delle navi e che va a costituire un inquinamento denominato operativo.

Il tema dell'inquinamento da idrocarburi colpisce molto l'opinione pubblica, soprattutto negli ultimi anni, per gli effetti e i danni visibili sull'ambiente.

In questa tesi si vuole altresì valutare la pericolosità che questo intenso trasporto potrebbe provocare laddove avvenissero versamenti lungo le rotte maggiormente percorse. Si prende in considerazione il bacino del Mar Adriatico e, sulla base delle rotte maggiormente interessate dal trasporto e dei

quantitativi di greggio trasportato, si analizza la quantità di idrocarburi che possono essere dispersi in mare attraverso rilasci operativi e si creano mappe di pericolosità relative a tali inquinanti.



Figura 1: Un mondo di petrolio

## 1.1 Inquinamento da Idrocarburi

Secondo una definizione del GESAMP (Group of Expert on the Scientific Aspect of Marine environmental Protection) l'inquinamento marino corrisponde:

*“...all'introduzione diretta o indiretta da parte umana, di sostanze o energia nell'ambiente marino...che provochi effetti deleteri quali danno alle risorse viventi, rischio per la salute umana, ostacolo alle attività marittime compresa la pesca, deterioramento della qualità dell'acqua...”*

Si possono così inquadrare tre tipi differenti di inquinamento:

- **Inquinamento sistematico** causato dalla continua immissione di inquinanti nel tempo come nel caso di scarichi fognari o reflui industriali.
- **Inquinamento operativo** causato dall'esercizio di natanti ad esempio il lavaggio di cisterne, lo scarico delle acque di zavorra.
- **Inquinamento accidentale** causato da veri e propri incidenti.

### 1.1.1 Trasporto petrolifero nel Mediterraneo

Il traffico petrolifero all'interno del Mar Mediterraneo costituisce all'incirca il 30% del traffico marittimo mondiale di petrolio e, a causa della sua morfologia, esso risulta anche una delle aree a più alto rischio di versamenti di idrocarburi. Si possono contare tre vie principali di passaggio da e verso il Mediterraneo: lo stretto di Canakkale, lo stretto di Gibilterra e il canale di Suez. La maggior parte del traffico segue una via da est a ovest, passando per la Sicilia, Malta e seguendo le coste di Tunisia, Algeria e Marocco. Benchè il Mediterraneo costituisca solo lo 0,8% della superficie delle acque mondiali il suo traffico petrolifero ammonta, secondo stime del REMPEC (Regional Marine Pollution Emergency Responce Centre for the Mediterranean sea) di Malta, a più di 360 milioni di tonnellate annue, delle quali più di 180 milioni di tonnellate sono dirette principalmente verso i porti italiani.

- 300 milioni di tonnellate entrano nel Mediterraneo
  - 180 milioni partono dal Medio Oriente dirette verso l'Italia
  - 100 milioni partono dal Nord Africa principalmente verso la Francia
  - 20 milioni partono dai paesi mediterranei verso altri paesi del bacino
- 20 milioni di tonnellate lasciano il Mediterraneo
  - 10 milioni attraversano lo stratto di Gibilterra
  - 10 milioni attraverso il canale di Suez
- 40 milioni di tonnellate attraversano il Mediterraneo per uscire dallo Stretto di Gibilterra
  - 20 milioni entrano nel Mediterraneo dal Mar Nero attraverso il Bosforo
  - 20 milioni giungono dal canale di Suez

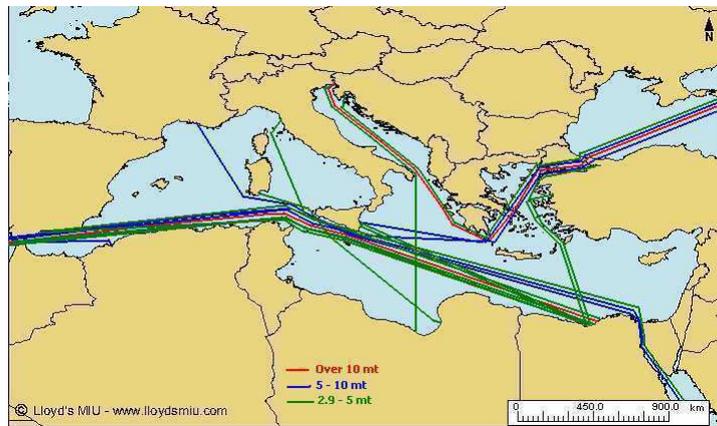


Figura 2: Principali rotte petrolifere nel 2006 (fonte Lloyd's)

Il fatto che il Mediterraneo sia un bacino semichiuso e con un lento ricambio di acqua e data la sua alta concentrazione di traffico, fa sì che ogni possibile versamento sia molto difficile da smaltire. Il ricambio di acqua superficiale è lento e stimato a circa 100 anni (Artegiani et al.). Il Mediterraneo non è però esente da incidenti petroliferi o da versamenti di altro tipo: secondo la UNEP (United Nation Environment Program) si stima che solo nel 2006 il volume di versamenti di idrocarburi nel Mediterraneo fosse di 400.000 tonnellate (viene inoltre considerato come l'area marina più inquinata del mondo). Dal 1985 si sono poi verificati ben 27 incidenti con un versamento complessivo di 270.000 tonnellate di idrocarburi (Silei, 2011). Negli ultimi vent'anni, benchè il traffico petrolifero sia aumentato, il numero di incidenti navali e di versamenti ha per fortuna riscontrato una forte diminuzione.

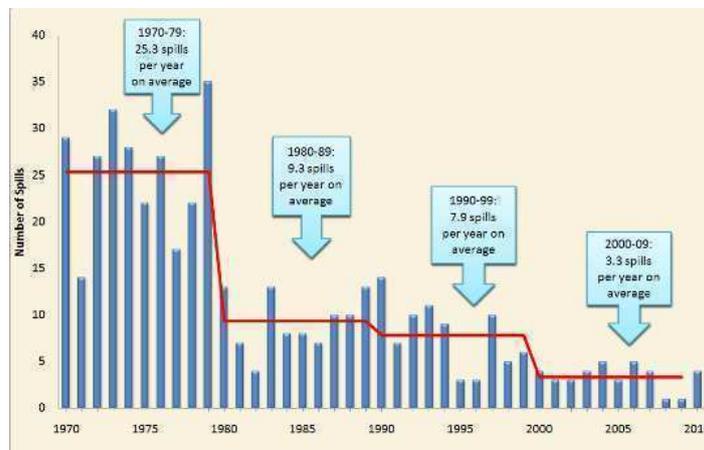


Figura 3: Andamento della quantità di versamenti negli ultimi 40anni (fonte ITOPF)

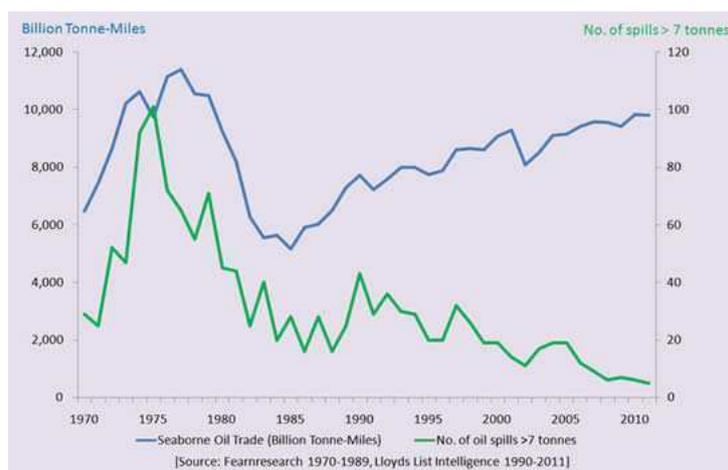


Figura 4: Trend del trasporto del petrolio rispetto al numero di incidenti (fonte Lloyd's)

L'incidente forse più grave che il Mar Mediterraneo abbia mai subito, fu quello che nel 1991 vide l'esplosione, e il successivo affondamento, della petroliera Heaven avvenuto al largo di Genova con un rilascio complessivo di ben 134.000 tonnellate. Haven, il cui nome completo era Amoco Mildford Haven, era la quarta petroliera di una serie di quattro navi gemelle costruite negli anni '80, capaci di trasportare più di 250.000 tonnellate. L'incidente avvenne la mattina dell'11 Aprile 1991; durante le operazioni di bilanciamento del carico e di travaso del greggio dalle cisterne laterali a quelle centrali,

si scatena un'esplosione con successivo incendio che perdurerà per ben tre giorni. Il 12 Aprile la nave riuscì ad essere agganciata, ancora in fiamme, da un rimorchiatore e trascinata verso la costa al largo di Arenzano. Il mattino del 14 Aprile si ebbe il completo affondamento a un miglio dal porto.



Figura 5: Affondamento della petroliera Haven

L'Italia, inoltre è il paese con il più alto numero di raffinerie e, con ben 14 porti costituisce una delle nazioni più esposte al rischio di incidente ambientale connesso al versamento di petrolio al mondo (Legambiente, 2007). In Italia vengono infatti movimentati annualmente circa 343 milioni di tonnellate di prodotti petroliferi e affini. Ogni anno transitano, vicino alle nostre coste, circa 102 milioni di tonnellate di prodotti petroliferi e 10 milioni di prodotti chimici. Nessuna regione italiana è risparmiata dalle rotte che effettuano le petroliere. Solo nel biennio 2008/2009 difatti, la Guardia Costiera ha rilevato ben 83 chiazze di inquinanti nelle acque italiane (Legambiente, 2007).



Figura 6: Immagine relativa all'incidente dell'Exxon Valdez

### 1.1.2 Caratteristiche degli idrocarburi in acqua

Un olio è un combustibile fossile composto essenzialmente da idrocarburi che deriva dalla decomposizione di organismi animali e vegetali avvenuta in ambiente anaerobico. Il petrolio varia le sue composizioni chimico-fisiche a seconda del luogo da dove viene estratto e le caratteristiche possono cambiare una volta a contatto con l'acqua. Le industrie petrolifere classificano infatti il petrolio in base alla località di produzione, al peso specifico e al contenuto di solfuri. Le proprietà principali di un idrocarburo sono la densità relativa, la viscosità, la distillazione caratteristica, il coefficiente di diffusione e il punto di scorrimento e il potere calorifico dipendenti tutte dalle composizione chimica dell'olio stesso.

La **densità relativa**, o peso specifico, rappresenta la densità dell'olio in relazione a quella dell'acqua pura. Molti oli possiedono una densità minore di 1; si nota infatti che, essendo più leggeri dell'acqua di mare avente densità di circa 1,025, essi galleggiano sulla stessa. L'American Petroleum Institute ha definito un' unità di misura: API (American Petroleum Institute Class Unit) in grado di descrivere la densità dell'olio e dei suoi prodotti. Essa è una misura di come la pesantezza e la leggerezza di un olio vengano comparate con la densità dell'acqua. Essa oltre a determinare la densità di un olio permette di confrontare vari oli tra loro. Viene calcolata attraverso la seguente formula:

$$API = \frac{141,5}{\text{densità specifica}} - 131,5$$

Tale misura varia il suo valore in un range che va da 17 a 45 in base alle caratteristiche dell'olio. Solitamente alti valori di API caratterizzano oli contenenti alte proporzioni di componenti volatili, mentre si definiscono pesanti gli oli aventi un API < 25. Si definiscono infatti oli leggeri quelli aventi un API maggiore di 40 e quindi densità specifica minore di 0,83 e oli pesanti aventi un API minore di 25 e una densità maggiore di 0,9. I petroli più leggeri sono generalmente anche i più costosi in quanto da questi è possibile ottenere dei prodotti più pregiati. Oli caratterizzati da una bassa densità, quindi da un API alto, possiedono solitamente una bassa viscosità e un'alta percentuale di componenti volatili.

GRUPPO	GRAVITA' SPECIFICA	DENSITA' °API	PERSISTENZA	ESEMPIO
gruppo I	< 0.8	> 45	non persistenti	<i>benzina, nafta, kerosene</i>
gruppo II	0.8-0.85	35-45	poco persistenti	<i>gasolio, Abu Dhabi Crude</i>
gruppo III	0.85-0.95	17.5-35	mediamente persistenti	<i>Arabian Light Crude</i>
gruppo IV	> 0.95	< 17.5	molto persistenti	<i>Heavy Fuel Oil, Venezuelan crude Oils</i>

Figura 7: Classificazione di un olio in base all'API (fonte ITOPF)

La **viscosità** rappresenta invece la resistenza di un olio al flusso. Oli molto viscosi fluiscono meno facilmente rispetto a oli meno viscosi che riescono a diffondersi rapidamente sulla superficie marina. Maggiore è la viscosità, più lento è l'olio e minore è la sua qualità. La viscosità può anche essere pensata come attrito interno tra le molecole dell'olio e rappresenta un fattore importante nel determinare le forze che devono essere vinte per permettere il movimento. Essa diminuisce all'aumentare della temperatura e infatti a temperature basse tutti gli oli diventano più viscosi e tale fenomeno cambia in base alle caratteristiche composizionali. Solitamente la temperatura dell'acqua marina risulta essere minore rispetto a quella che si può riscontrare all'interno di una petroliera e difatti, al contatto con l'acqua, un olio risulta essere maggiormente viscoso. La viscosità è un fattore fondamentale per capire se un olio è suscettibile al trattamento attuato da dispersanti e per determinare la difficoltà di recupero, inoltre in mare la viscosità risulta aumentare con il tempo.

La **distillazione caratteristica** di un olio descrive la sua volatilità. Come si aumenta la temperatura di un olio, i diversi componenti raggiungono di volta in volta il loro punto di ebollizione e possono essere così distillati. Essa controlla la velocità e il grado di evaporazione di un idrocarburo. Prodotti come il kerosene e la benzina possono evaporare in poche ore, greggi leggeri possono evaporare del 40% nel giro di un giorno mentre oli pesanti sono caratterizzati da una lenta e piccola evaporazione.

Il **coefficiente di diffusione** è funzione della tensione superficiale. La tensione superficiale è la proprietà che possiede un liquido e che lo porta a comportarsi come se la sua superficie fosse caratterizzata da una membrana elastica. Tale proprietà è determinata dalla coesione tra le molecole superficiali che, essendo a contatto con una superficie diversa e quindi non circondate completamente da molecole dello stesso tipo, tendono ad essere più

attratte tra loro. Il coefficiente di diffusione viene utilizzato per determinare il tasso con il quale l'olio si estende sulla superficie del mare.

Il **punto di scorrimento** rappresenta la temperatura più bassa alla quale un olio riesce a rimanere fluido e quindi pompabile. Se la temperatura dell'ambiente è più bassa di quella del punto di scorrimento, l'olio inizia a comportarsi come un semisolido in quanto perde scorrevolezza poichè iniziano ad aggregarsi i cristalli di cera presenti in esso. Il punto di scorrimento o Puor point, è infatti funzione del contenuto di cera e di asfalteni. Il contenuto di cera influenza infatti il comportamento di un olio. Oli aventi un tenore di contenuto di cere superiore al 10% tendono a avere alti punti di scorrimento. Il contenuto di asfalteni indica invece quanto facilmente un olio possa formare emulsioni. Oli con una concentrazione di asfalteni maggiori di 0,5% formano emulsioni stabili in grado di contenere nel suo volume fino all'80% di acqua.

### Processi di trasformazione chimico-fisica degli idrocarburi in acqua

A seguito di un versamento di idrocarburi in mare, l'olio rilasciato può subire diverse variazioni a seguito delle interazioni con l'acqua e con le correnti marine. L'olio si spande sulla superficie dell'acqua formando uno strato che andrà via via cambiando le proprie caratteristiche. Il destino di un idrocarburo in acqua dipende da vari fattori: quantità di olio versato, caratteristiche fisico-chimiche dell'olio, condizioni del mare e del tempo. La tendenza è solitamente quella di diffondersi, rompersi e dissiparsi in base ai processi che vi agiscono. Tutte le alterazioni a cui un olio sversato in mare è soggetto vengono classificate con il nome di weathering. Benchè queste avvengano quasi simultaneamente, la loro importanza varia nel tempo e così anche la loro entità. Tali processi sono espansione superficiale, evaporazione, dispersione, dissoluzione, emulsificazione, ossidazione, sedimentazione e biodegradazione. La velocità con cui tali processi agiscono dipendono da vari fattori. Processi come l'evaporazione, la dispersione, la dissoluzione favoriscono la scomparsa dell'olio dalla superficie marina, mentre processi quali l'emulsione ne promuove la persistenza.

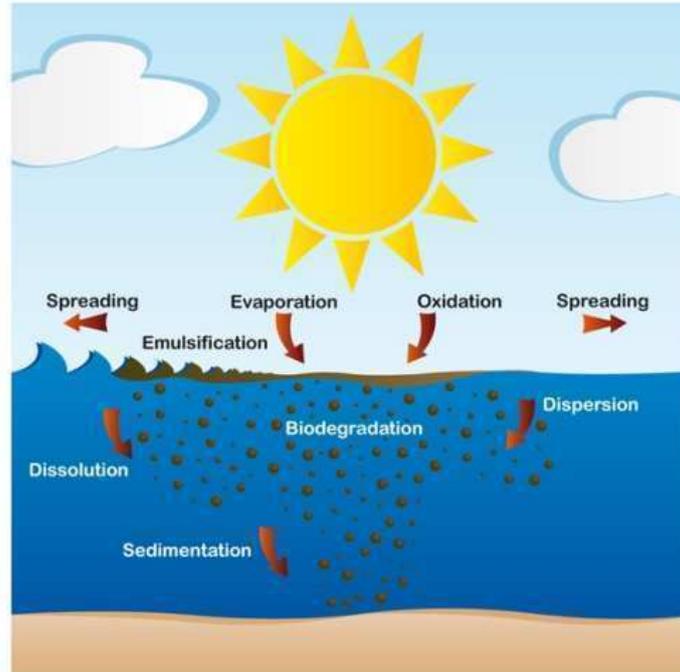


Figura 8: Processi di trasformazione chimico-fisica in acqua (fonte ITOPF)

**Espansione superficiale.** Immediatamente successivo al versamento è il fenomeno di espansione sulla superficie. In tale processo gli idrocarburi cominciano a propagarsi come un'unica macchia con una velocità che dipende dalla viscosità. Oli con una viscosità bassa si espandono più velocemente rispetto a quelli a più alta viscosità. Inizialmente l'olio si espande come un fluido uniforme, poi successivamente, inizia a disgregarsi scindendosi in una parte più sottile e in una più spessa. La parte sottile è costituita da oli con bassa viscosità, mentre la parte spessa, da idrocarburi che solidificano più velocemente e che hanno una difficile espansione. Queste differenze permettono di individuare variazioni nello spessore dell'inquinante le quali verranno ulteriormente incrementate dall'effetto di venti, onde e correnti turbolente.

**Evaporazione.** Esso rappresenta il processo per mezzo del quale un idrocarburo è rimosso dalla superficie dell'acqua. Tale processo dipende dalla volatilità di un olio. Solitamente l'evaporazione di oli con potere calorifico minore di 200°C avviene in un periodo di circa 24 ore. La parte di idrocarburo rimasto successivamente al processo di evaporazione è caratterizzato da una densità e una viscosità maggiore rispetto alla precedente. Specie di idrocarburi raffinati e leggeri come il Kerosene e la benzina possono evaporare completamente in poche ore.

**Dispersione.** A causa dell'azione delle onde e delle correnti marine, gli idrocarburi possono disperdersi in frammenti di grandezza diversa, i quali rimarranno in sospensione nella colonna d'acqua oppure ritorneranno in superficie se aventi una dimensione troppo elevata. L'entità della dispersione dipende dalla natura dell'olio e dalle condizioni del mare, e avviene in modo più rapido in corrispondenza di oli a bassa viscosità e laddove siano presenti onde e turbolenze.

**Dissoluzione.** Il tasso di dissoluzione dell'idrocarburo in acqua dipende dalla sua composizione, dalla temperatura a cui si trova e dalle turbolenze a cui è soggetto. I componenti pesanti degli oli sono insolubili in acqua di mare, mentre quelli più leggeri, come ad esempio gli idrocarburi aromatici, sono solubili. Essi, tra cui il benzene e il toluene, sono infatti i primi a essere evaporati. Benchè faccia parte di uno dei processi di trasformazione a cui l'olio è soggetto, non provoca un contributo significativo nell'opera di rimozione.

**Emulsificazione.** L'emulsificazione consiste nella formazione di masse viscidose e schiumose che galleggiano sulla superficie dell'acqua, dovute alla sospensione di goccioline di acqua sugli idrocarburi in seguito a un mescolamento provocato dalla turbolenza superficiale. Oli viscosi tendono a sospendere le goccioline d'acqua in modo più veloce rispetto a oli più liquidi; condizioni favorevoli a tale processo si verificano inoltre in condizioni di venti tra i 7 e i 10 nodi. L'emulsificazione, provocando la persistenza di oli sulla superficie marina, riduce la capacità di rimozione e della stessa alterazione.

**Ossidazione.** L'idrocarburo può reagire con l'ossigeno per formare prodotti solubili o composti persistenti come il catrame. L'ossidazione è un fenomeno promosso dalla luce solare; sotto l'effetto di un'elevata radiazione solare il sottile strato di olio può infatti rompersi ma tale processo rimane comunque molto lento.

**Sedimentazione.** Alcuni oli possiedono una densità tale da affondare nella colonna d'acqua e precipitare sul fondo a causa di interazioni di particelle di sedimenti e di materiali organici nei confronti dell'idrocarburo. Acque con bassa profondità presentano condizioni favorevoli alla sedimentazione.

**Biodecomposizione.** Nell'acqua sono presenti microorganismi e batteri che riescono a degradare l'olio in composti solubili o in anidride carbonica e acqua. I fattori che influenzano questo tipo di rimozione sono rappresentati dal livello dei nutrimenti presenti nella colonna d'acqua, la temperatura e la quantità di ossigeno disciolto. Goccioline di dimensioni minori aventi una maggiore superficie e quindi area disponibile vengono biodegrate più velocemente.

Per capire come i vari processi interagiscano con la macchia di olio vengono utilizzati modelli in grado di determinare la loro entità. La loro importanza varia in funzione del tempo: processi come l'espansione superficiale, l'evaporazione, la dissoluzione, la dispersione e l'emulsificazione caratterizzano la prima fase di alterazione, ovvero sono presenti già nelle prime ore dal versamento mentre il loro effetto diminuisce nel giro di pochi; mentre l'ossidazione, la sedimentazione e la biodegradazione caratterizzano i periodi successivi.

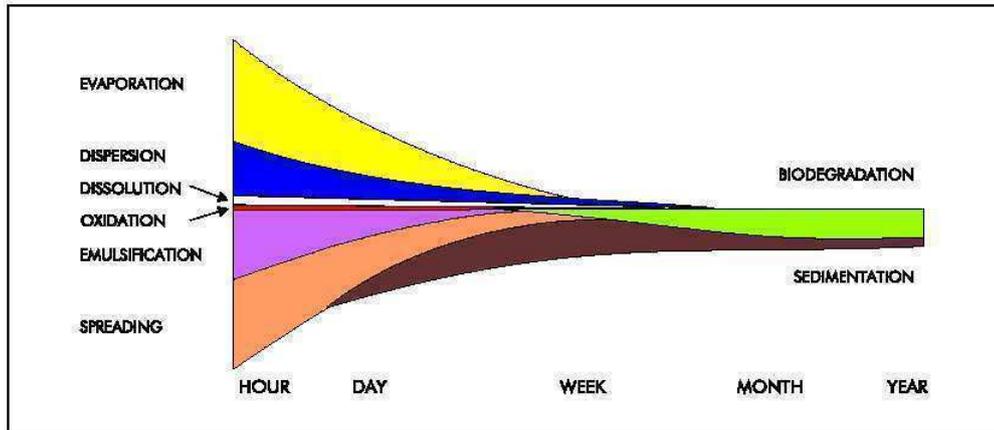


Figura 9: Rappresentazione di come i processi di weathering cambino la loro importanza col tempo (fonte ITOPF).

### 1.1.3 Cause di versamenti, impatti sull'ambiente e ripristino

Benchè molto rilevanti, i versamenti dovuti ad incidenti risultano rappresentare solamente una piccola parte della totalità degli scarichi a mare di petrolio. Analizzando inoltre le cause riguardanti l'avvenimento di versamento dovuto a avvenimenti accidentali si trova che il 9% è determinato da affondamenti, il 17% da collisioni, il 21% da incagli, l'14% è imputabile a incendi o esplosioni, l'11% a trasbordo di petrolio e infine il 28% è imputabile ad altre cause (REMPEC, 2011).

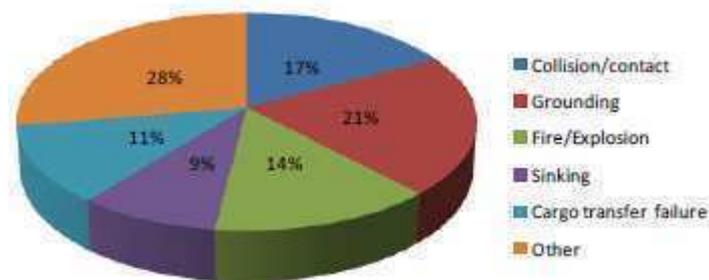


Figura 10: Cause di versamenti accidentali nel trasporto marittimo (fonte REMPEC)

La maggior parte dei versamenti è però dovuta ad azioni di routine come lo scarico di acque di zavorra e il lavaggio di cisterne prima dell'arrivo in porto, il rifornimento di carburante, l'eliminazione di acqua di sentina, il lavaggio di bacino di carenaggio e le perdite durante lo scarico ai terminal. Queste procedure, effettuate al largo, riversano agenti inquinanti che sospinti da venti e correnti si riversano nelle aree costiere. Secondo le statistiche redatte dall'ITOPF, i versamenti di piccola o media entità ovvero con meno di 7 tonnellate sversate, rappresentano il 95% dei versamenti registrati, inoltre una grande percentuale di questi son attribuibili a azioni che avvengono appunto durante attivita' di routine (ITOPF 2011).

**Impatti ambientali** L'inquinamento da idrocarburi può causare diversi impatti sull'ecosistema marino la cui entità può dipendere da molti fattori quali la quantità di olio sversata, la tipologia di incidente, la distanza dalla costa e le condizioni metereologiche. Gli effetti di un versamento dipendono

dalle caratteristiche dell'olio, dalla zona interessata, dalla stagione in cui tale versamento avviene e dalle condizioni climatiche. Un versamento solitamente produce due tipi di effetti le cui conseguenze si diversificano nel tempo: effetti acuti e effetti cronici. Gli effetti acuti sono quelli che si riscontrano nel breve periodo i quali provocano la morte degli organismi animali e vegetali e immediate modifiche all'ecosistema; gli effetti cronici, invece, si riscontrano nel lungo periodo e pur non provocando morte o modifiche immediate, producono effetti ritardati. A risentire degli effetti provocati da un versamento di oli sono prima di tutti gli organismi marini, le uova e i piccoli pesci, i crostacei come il fitoplancton, gli invertebrati filtratori come ad esempio i coralli e infine l'avifauna a contatto con la superficie marina. Laddove poi le chiazze di petrolio raggiungano il litorale esse provocano danni anche a tutti gli habitat presenti ricoprendo e uccidendo tutti gli organismi della fascia costiera, le zone costiere a risentirne maggiormente sono le regioni tropicali caratterizzate da habitat di mangrovie le quali vedono le radici aeree delle piante ricoprirsi di petrolio e soffocare. Gli inquinanti possono venire assorbiti dagli organismi per effetto diretto: contatto o ingestione; o per effetto indiretto. Per quanto riguarda gli effetti acuti, il petrolio, formando una sottile pellicola sulla superficie dell'acqua, va a impedire gli scambi gassosi con l'esterno provocando una successiva condizione di anossia; esso limita inoltre la penetrazione della luce del sole all'interno della colonna d'acqua causando una diminuzione dell'attività fotosintetica da parte di alghe e licheni. Inoltre aderisce agli organismi che ne entrano in contatto all'interfaccia aria mare impedendone le funzioni vitali. Nel caso delle madrepore e degli organismi bentonici il pericolo si manifesta quando la marea nera raggiunge le acque a bassa profondità. Le madrepore costituiscono le barriere coralline e vivono in simbiosi con alghe unicellulari che per sopravvivere necessitano di particolari condizioni di irraggiamento e trasparenza. La macchia di petrolio provoca invece ombre che vanno a pregiudicare tali condizioni mettendo a rischio l'intera sopravvivenza della comunità corallina. Gli organismi pelagici hanno invece la possibilità di allontanarsi dalla nube di inquinamento. Sono però molti gli animali che rimangono invischiati nella sua coltre. A farne le spese sono soprattutto le larve di pesci, vulnerabili sono inoltre cetacei e rettili ai quali, dovendo riemergere per respirare, vengono otturati le narici e la bocca. Per quanto riguarda i mammiferi si possono verificare casi di ipotermia e inibizione dell'olfatto che pregiudica la capacità di predazione e

il riconoscimento.



Figura 11: Effetti del petrolio sugli uccelli.

Ma più di tutti a risentirne sono gli uccelli acquatici, che trascorrono lungo tempo sulla superficie del mare o vicino alle coste, le cui piume, a contatto con l'olio, perdono la capacità di impermeabilizzarsi e quindi la possibilità di galleggiare, volare o nuotare con la conseguenza di un successivo annegamento; si ha inoltre la provocazione dell'aumento del metabolismo e di una maggiore dispersione del calore.

Gli effetti cronici si verificano invece laddove la tossicità dell'olio risulti a un livello inferiore rispetto a quello letale ma la cui presenza provochi notevoli alterazioni in grado di ripercuotersi successivamente sull'intero ecosistema. Si può avere ad esempio un'alterazione fisiologica, fisica e comportamentale, modificazioni nelle composizioni in specie delle comunità biologiche e modificazioni alle interazioni come quella preda-predatore.

La tossicità del petrolio e quindi la sua pericolosità nei confronti degli organismi con i quali è a contatto, dipende dalla sua composizione e solitamente diminuisce all'aumentare del tempo di permanenza grazie al processo di evaporazione che porta all'eliminazione dei componenti più volatili e anche più tossici. Il petrolio che va a sedimentare sul fondo è quello più pericoloso in quanto può interferire sulla vita sia degli organismi superiori sia sui microorganismi presenti. Gli effetti prodotti da un versamento possono essere di varia portata e presentare una minaccia sia per l'ambiente che per l'economia. Attività ricreative come ad esempio la pesca, il turismo, le industrie locali sono risorse a rischio in caso di versamenti di olio. Esso porta inoltre ripercussioni sulla salute umana in quanto essendo buona parte

degli idrocarburi cancerogeni essi si possono ritrovare negli organismi marini e successivamente all'interno della catena alimentare fino a noi.

**Azioni di ripristino** Solitamente l'ambiente e gli organismi, grazie al loro alto grado di resilienza, riescono a resistere ai cambiamenti apportati da un versamento e a ritornare con il tempo alle condizioni precedenti. Molti organismi infatti per far fronte ai vari cambiamenti, dovuti anche alle tipiche fluttuazioni stagionali, producono un gran numero di uova e larve in modo da sfruttare al massimo lo spazio. Il recupero attuato dall'ambiente per riprendersi dipende da vari fattori caratterizzanti l'idrocarburo e dalle strategie di pulizia su esso apportate. L'eliminazione dell'idrocarburo tramite la pulizia rappresenta la prima fase di recupero ambientale.

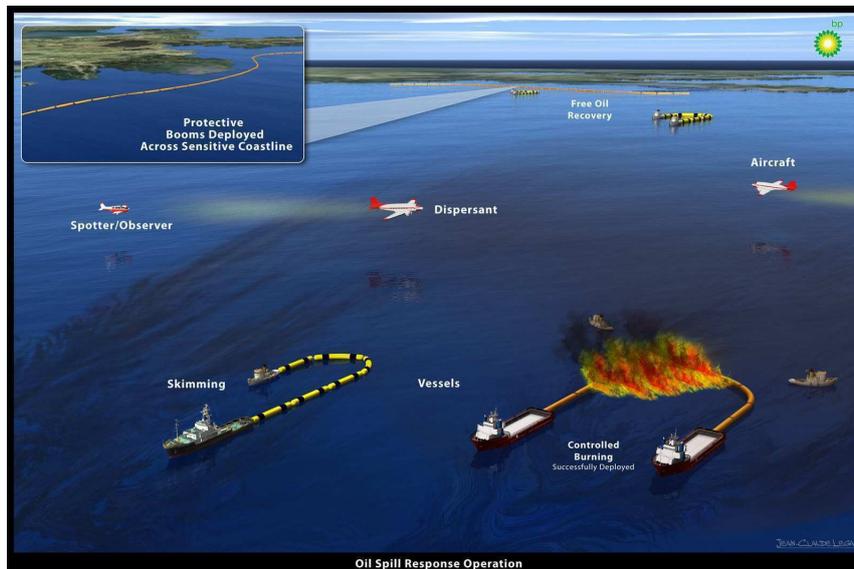


Figura 12: Immagine relativa ai metodi di risanamento successivi a un versamento

Vi sono tecniche di monitoraggio, attraverso osservazione aerea, immagini satellitari o sistemi galleggianti, che permettono di seguire la macchia di olio durante il suo percorso. La ricognizione aerea permette di valutare la posizione e l'estensione dell'idrocarburo in modo da facilitare il controllo delle operazioni di pulizia. Il risanamento e l'eliminazione del petrolio in mare si basano solitamente sull'uso di tecniche meccaniche come pompe, schiumatoi e braccia o l'utilizzo di tecniche chimiche come i disperdenti.

L'uso di braccia permette di contenere e concentrare l'olio in un punto e impedirne la successiva propagazione in modo da facilitarne il successivo recupero. Essi possono essere di varie forme e tipi, il loro utilizzo dipende però dalle condizioni ambientali in quanto non possono venire utilizzate in caso di corrente superiore ai 0,4 m/s. Gli skimmer, o schiumatoi, permettono invece il recupero dell'olio dall'acqua attraverso pompe che aspirano l'olio.

La tecnica dei disperdenti chimici consiste nello spruzzare, sulla superficie marina, un detergente, costituito da solventi e tensioattivi, in grado di disperdere l'olio e accelerarne la sua eliminazione. Una volta spruzzati sulla superficie dell'acqua il solvente distribuisce i tensioattivi nella chiazza d'olio in modo da diminuire la tensione superficiale all'interfaccia olio-acqua. Se utilizzato bene risulta essere un metodo efficace poichè l'energia delle onde farà sì che la macchia si rompa e venga diluita molto velocemente. Tale metodo accelera il processo di degradazione favorendo la biodegradazione del petrolio nell'ambiente e rallenta inoltre il processo di emulsificazione. In questo modo l'idrocarburo si può trovare sparso per la colonna d'acqua a concentrazioni molto basse e può così essere accessibile alla degradazione batterica. Tale processo non è però immediato e può venire utilizzato solo in determinate condizioni, anche se a volte risulta l'unico metodo utilizzabile. L'efficienza varia poi in base al tipo di alterazione e l'utilizzo è possibile solo entro le prime 12 ore dal versamento. Esso ha uno scarso effetto su oli viscosi mentre è in grado di disperdere bene oli liquidi o emulsioni aventi punto di scorrimento vicino alla temperatura dell'ambiente. I disperdenti vengono spruzzati attraverso aerei o da imbarcazioni dotate di mulinello. Fino a poco tempo fa però, i costituenti chimici dei dispersanti risultavano essere tossici e provocare più danni che vantaggi; oggi però si fa uso di componenti in grado di non provocare conseguenze negative.

Prossime al disuso son invece le tecniche come la combustione o l'abbattimento che si limitano a trasferire l'olio in atmosfera o sul fondo del mare. La combustione libera però notevoli quantità di gas e provoca una ricaduta di residui solidi in mare, la rimozione per abbattimento consiste invece nello spargimento di materiali inerti in superficie che, andando ad aumentare la densità dell'olio ne provocano l'affondamento. Spesso però l'unico metodo utile per smaltire una fuoriuscita di petrolio, laddove non si riesca a agire in mare, è aspettare che questo raggiunga la costa e essere lì pronti per le operazioni di pulizia che vedranno prima la rimozione di oli pesanti poi le

tracce più piccole.



Figura 13: Immagine relativa alla pulizia di una spiaggia

#### 1.1.4 Area di studio: Mar Adriatico

Il Mar Adriatico è un bacino semichiuso di forma allungata che ricopre un'area di  $138,595\text{km}^2$  al centro del Mediterraneo tra la penisola italiana e i Balcani. Esso è quasi completamente circondato da catene montuose che ne determinano un forte controllo del vento. Nella parte settentrionale, nella zona di apertura tra le Alpi e le Alpi Dinariche, si presenta periodicamente un vento proveniente da nord-est: la Bora. Un ulteriore vento che influenza la circolazione del bacino è lo Scirocco, esso proviene da sud-est e segue la direzione dell'asse maggiore del bacino tra Appennini e Alpi Dinariche (Zavatarelli et al, 2002). La morfologia del fondo e le caratteristiche fisiche delle acque hanno creato la suddivisione convenzionale dell'area in tre sottobacini (Artegiani et al, 1997).

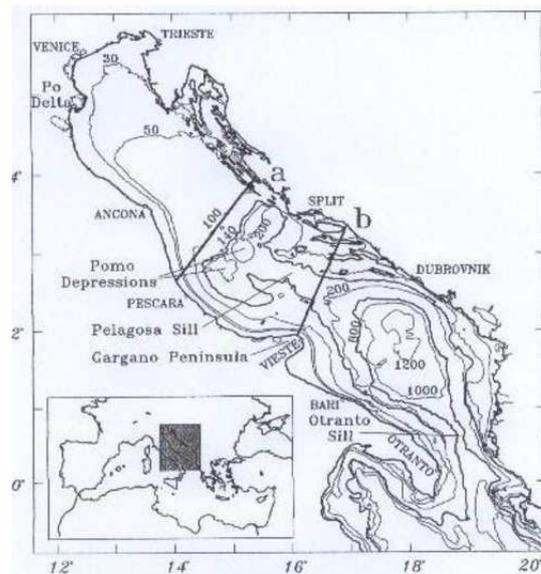


Figura 14: Mappa che mostra come viene suddiviso il Mar Adriatico

La prima area, nella zona dell'Adriatico settentrionale, è caratterizzata da una limitata profondità corrispondente in media a 35 m, la parte centrale, che rappresenta una zona di transizione tra nord e sud da Giulianova Marche fino al Gargano, è moderatamente profonda con due depressioni che raggiungono i 260 m; la parte sud che si estende fino allo stretto di Otranto è caratterizzata da depressioni che raggiungono i 1.200 m. La costa si presenta differente nella parte occidentale rispetto a quella orientale; la prima bassa,

sabbiosa e regolare è caratterizzata da isobate parallele alla linea di costa e una profondità che aumenta uniformemente mentre la seconda alta, rocciosa e irregolare è disseminata di molte isole e promontori che si innalzano dalle profonde acque costiere. L'Adriatico viene raggiunto da un gran numero di fiumi, che rilasciano il materiale trasportato in sospensione e che influenzano la circolazione del bacino, particolarmente importante è l'apporto del fiume Po e di alcuni fiumi albanesi. La temperatura superficiale si aggira attorno ai 20°C con un'escursione termica di 8° tra nord e sud. Attraverso lo stretto di Otranto entrano nell'Adriatico acque superficiali salate e calde mentre ne escono in profondità di fredde e poco salate. Il guadagno totale di acqua è positivo, con una media annuale di circa 1 metro dovuto al contributo dei fiumi e al quasi totale annullamento tra evaporazione e precipitazione (Raicich, 1996; Artegiani et al, 1997). Nel complesso l'Adriatico è un bacino di diluizione contrariamente al Mediterraneo che è invece un bacino di concentrazione salina. Esso è molto interessante dal punto di vista della circolazione termoalina che caratterizza gli spostamenti delle masse d'acqua e che differisce dalla circolazione superficiale caratterizzata invece dall'azione del vento. Proprio per la sua posizione geografica e morfologica l'Adriatico è soggetto a intensi meccanismi forzanti che producono variazioni stagionali della circolazione (Artegiani et al, 1997).

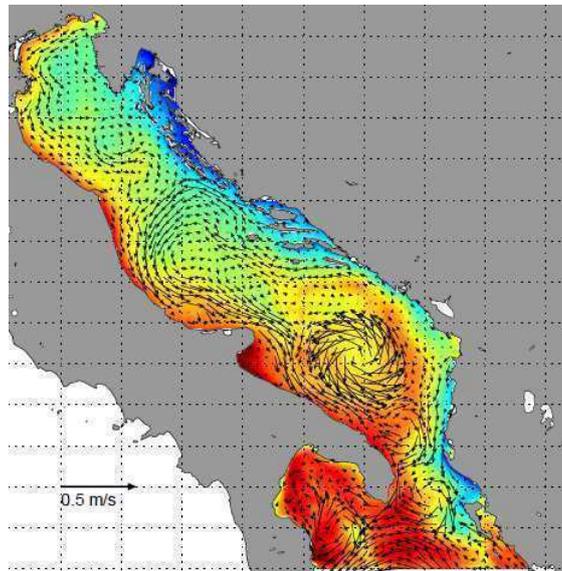


Figura 15: Circolazione del Mar Adriatico media simulata da AFS

La circolazione superficiale è caratterizzata da un giro ciclonico a grande scala con un flusso verso nord lungo la costa orientale (Eastern Adriatic Current, EAC) e, un flusso di ritorno in direzione meridionale, lungo la costa occidentale (Western Adriatic Current, WAC). Nel nord Adriatico si osserva come struttura predominante la Northern Adriatic Current, essa ha una struttura e una posizione direttamente influenzata dal fiume Po. Durante il periodo invernale, la corrente è prossima alla foce del Po e si estende per circa 100 km lungo la parte ovest dell'Adriatico. Tale corrente durante la primavera si unisce alla corrente medio-adriatica e va a creare meandri che interessano quasi l'intera metà del bacino. In estate le correnti si separano nuovamente per riunirsi in autunno formando un forte flusso lungo la costa. Sempre durante i periodi estivo e autunnale il nord Adriatico è caratterizzato dalle strutture dei gyres. La parte centrale e meridionale del bacino è invece caratterizzata da gyri presenti anche in questo caso prevalentemente in estate e autunno, i quali diminuiscono in primavera e sono del tutto assenti in inverno (Artegiani et al, 1997), L'Adriatico rappresenta l'unico sito di formazione di acque profonde del Mediterraneo, secondo solo al Golfo del Leone (Pollak, 1951; Buljan, 1976). Le dinamiche di sedimentazione determinano la distribuzione dei sedimenti lungo le coste e la formazione di bande di sedimenti fini accumulati approssimativamente paralleli alle coste (Mang e Pinardi, 2002). Nella zona centrale, a causa dell'azione delle correnti, si ha un elevato accumulo di sedimenti in direzione meridionale. L'ecosistema è influenzato dalle condizioni idrodinamiche del bacino, con un'elevata variabilità stagionale controllata dagli eventi atmosferici e dagli apporti fluviali. L'Adriatico è poi caratterizzato da un' elevata concentrazione di nutrienti che tende a diminuire verso sud e allontanandosi dalla costa.

## 1.2 Rischio e pericolosità

La pericolosità e il rischio son due concetti che si possono trovare ovunque e sono in molti a pensare che le due cose si equivalgano; vi è però da dire che essi devono essere considerati in contesti differenti. Con pericolosità si intende una situazione esistente che può causare un danno prodotto ad esempio da rumore, stress o prodotti chimici. Il rischio rappresenta il cambiamento che ogni pericolo può effettivamente arrecare provocando un danno a qualcosa o conseguenze negative. Mentre il pericolo riguarda una situazione esistente, il rischio è collegato a qualcosa futuro. La pericolosità è la possibilità di un danno mentre il rischio è la probabilità del suo verificarsi (Chapman, 2007). Crichton (1999) definì il rischio come la probabilità di una perdita coinvolgendo la pericolosità e i concetti di vulnerabilità e esposizione. In termini matematici, il rischio può essere definito come il prodotto tra pericolosità e vulnerabilità (Sayers et al., 2002).

Il rischio viene definito inoltre come prodotto tra probabilità di accadimento di un evento dannoso o pericolosità ( $P$ ) e entità del danno provocato dall'evento stesso ( $D$ )

$$R = P \cdot D$$

La pericolosità,  $P$ , è definita come la probabilità che si verifichi un evento entro un determinato intervallo di tempo (frequenza) Il danno,  $D$ , può essere considerato come prodotto tra un fattore di vulnerabilità ( $V$ ) che dipende dalle potenzialità di recare danno, e da un fattore di esposizione ( $E$ ) che è funzione della durata dell'esposizione:

$$D = V \cdot E$$

Esposizione è la misura di tutto ciò che si può perdere a seguito del verificarsi di un evento avverso in una certa area. La vulnerabilità è la frazione del valore esposto che può essere persa a seguito del verificarsi di uno specifico evento avverso.

### 1.2.1 Analisi di pericolosità

Per quanto riguarda gli effetti che intercorrono come conseguenza a un rilascio di idrocarburi a mare si deve tenere conto di molteplici fattori. Il rischio cambia infatti in base ai soggetti considerati, alle zone e a altri fattori. Il rischio è molto difficile da valutare se non si conoscono con esattezza

le varie condizioni e è legato alle conseguenze negative che un accadimento può provocare. Per quanto riguarda la pericolosità, essa non determina gli effetti che un eventuale perdita potrà indurre su salute umana, animale, ambiente o economia; bensì solamente la quantità di perdita in relazione a una certa soglia di riferimento prestabilita. Laddove questa soglia di riferimento, definita, nel nostro caso, come concentrazione di idrocarburo in mare, venga superata; si ha un aumento del possibile danno causato dal versamento. La pericolosità e' rappresentata come la frequenza di accadimento del superamento della concentrazione della soglia di riferimento e si esprime come percentuale di giorni in cui si supera tale soglia. Essa si propone quindi solamente di valutare in quali aree è possibile trovare una concentrazione di idrocarburi superiore rispetto a quella consentita tale da provocare successivi danni all' ambiente.

### 1.3 Obiettivo della tesi

La tesi verte sull' studio di mappe di pericolosità di versamenti di idrocarburi in mare. Tali mappe permettono di valutare le regioni dove tali versamenti siano più probabili e dove si possano verificare situazioni di danno per l'ambiente circostante. La dispersione degli inquinanti, nella zona del Mar Adriatico, viene valutata considerando i versamenti dovuti alle normali attività di routine delle navi come appunto scarico di acque di zavorra e lavaggio delle cisterne, il cosiddetto inquinamento operativo. Per ottenere come questi idrocarburi si disperdano, una volta sversati in mare, si utilizza un modello matematico denominato MEDSLIK II. Esso è un modello lagrangiano nel quale la macchia d'olio viene descritta da un certo numero di particelle, lo spostamento delle quali è determinato dai campi di corrente e di vento.

Il disegno sperimentale si articola come segue:

- si definisce la principale rotta di trasporto di petrolio del Mar Adriatico oggetto dello studio;
- si discretizza il versamento, che nella realtà potrebbe avvenire in qualsiasi punto della rotta di interesse, in punti di rilascio distanti tra loro 100 miglia;
- si svolgono le simulazioni in ogni punto di rilascio per i giorni 1, 10 e 20 nei mesi di Febbraio, Maggio, Agosto e Novembre e se ne segue la dispersione e la trasformazione per i 10 giorni successivi al rilascio, in modo da avere un andamento completo dei 4 mesi considerati;

L'output di ogni simulazione fornisce per ogni punto di rilascio la concentrazione relativa alle 240 ore successive al versamento.

Si procede poi nel seguente modo:

1. gli output relativi ai vari punti vengono sommati e aggregati spazialmente in modo da creare la rotta di interesse;
2. gli output vengono poi aggregati nel tempo calcolando la massima concentrazione riscontrata.
3. si esegue l'analisi statistica per il calcolo della pericolosità, cioè della frequenza di accadimento di eventi che superano una fissata concentrazione di riferimento.

Il risultato finale corrisponde a una mappa di pericolosità mensile relativa alla traccia considerata.

## Capitolo 2

### 2 Dati e Metodi

#### 2.1 Sistema di previsione dello spostamento e trasformazione degli idrocarburi in mare

Per la gestione di un versamento di idrocarburo in mare bisogna considerare vari aspetti fondamentali: dove arriverà l'olio, quando arriverà e quali saranno le caratteristiche al momento del suo arrivo. Per conoscere il dove e il quando si può utilizzare un modello di previsione del trasporto e trasformazione di idrocarburi. Nella presente tesi si è utilizzato il modello MEDSLIK II (De Dominicis, 2012), il quale è un modello di tipo lagrangiano, ovvero a particelle. Dal momento che il trasporto della macchia d'olio è governato dalle correnti marine superficiali e dal forzante ventoso, nella trattazione della tesi si sono eseguiti gli esperimenti facendo uso di due modelli oceanografici di previsioni differenti uno relativo all'intero Mediterraneo (Mediterranean Forecasting System, MFS), l'altro relativo al solo bacino dell'Adriatico (Adriatic Forecasting System, AFS); i campi di vento utilizzati sono invece prodotti dall'ECMWF.

##### 2.1.1 MFS e AFS: modelli di previsione di corrente

Il Gruppo Nazionale di Oceanografia Operativa dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia sviluppa, per i suoi studi e per le previsioni dello stato del mare, modelli oceanografici: MFS, che copre l'intero Mediterraneo, e l'AFS riguardante invece la zona dell'Adriatico. I modelli numerici per previsioni oceanografiche iniziarono a essere utilizzati all'inizio degli anni '90 (Pinardi et al, 2002). Entrambi i modelli riescono a valutare l'andamento e l'intensità delle correnti e a creare così il campo di corrente che in un determinato momento interessa una determinata area.

Per quanto riguarda il modello MFS l'area interessata comprende l'intero Mediterraneo. Il codice numerico discretizza le equazioni di Navier-Stokes e utilizza uno schema di assimilazione 3DVAR (Dobricic et al., 2007). La risoluzione orizzontale di MFS è  $1/16 \cdot 1/16^\circ$ , circa 6 km, e 72 livelli verticali non omogeneamente distribuiti (Tonani et al, 2008).

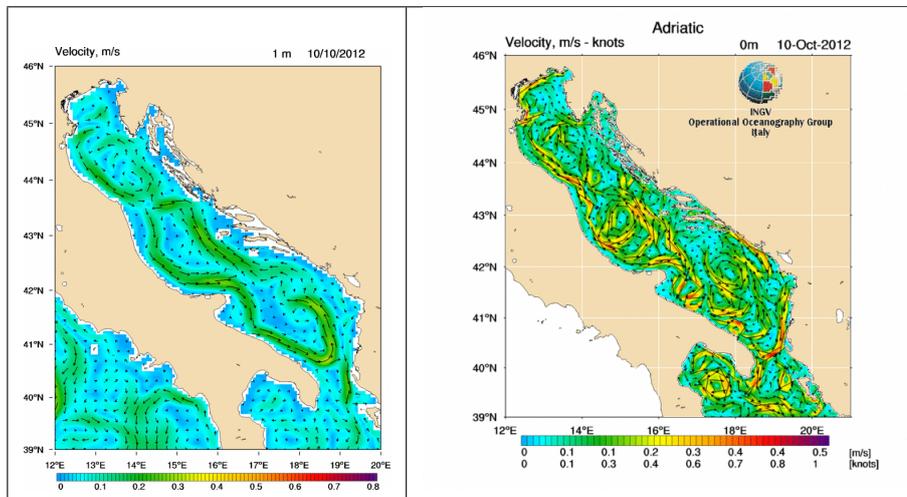


Figura 16: Immagini relative alla velocità delle correnti medie giornaliere per il giorno 10 Ottobre 2012 utilizzando a destra il modello MFS e a sinistra il modello AFS. (immagini scaricate dal sito [www.gnoo.bo.ingv.it](http://www.gnoo.bo.ingv.it))

Per quanto riguarda invece il modello AFS l'area di studio riguarda il solo bacino Adriatico; il modello numerico usato è il Princeton Ocean Model (POM) implementato sul mar Adriatico (Guarnieri, 2010), la cui risoluzione è  $1/45^\circ$ , circa 2 km. Esso ha quindi una risoluzione maggiore rispetto al modello MFS e permette di osservare correnti più intense e turbolente. MFS risulta quindi un modello a bassa risoluzione ovvero rappresentativo di correnti medie  $\varphi = (\bar{\varphi})$  mentre AFS, essendo un modello a più alta risoluzione, permette di rappresentare correnti  $\varphi = \bar{\varphi} + \varphi'$ , secondo la teoria di Reynolds, affette da vortici e turbolenze. AFS e MFS producono ogni giorno una previsione di 10 giorni riguardo la direzione e l'intensità delle correnti, la temperatura e il livello del mare. Per entrambi i modelli si utilizzano come dati di vento i forzanti atmosferici forniti dall'ECMWF (European Center for Medium range Weather Forecast).

### 2.1.2 Modello di previsione del trasporto e trasformazione degli idrocarburi in mare MEDSLIK II

La determinazione della dispersione di idrocarburi in mare rappresenta un obiettivo fondamentale negli studi oceanografici, e proprio con questo scopo son stati creati vari modelli in grado di predire il comportamento di macchie di inquinanti una volta sversati in mare. MEDSLIK II è basato sul precedente MEDSLIK creato da Lander e Zodiatis al Centro Oceanografico dell'Università di Cipro (Lander, 2006). Tale modello simula il trasporto della macchia d'olio governato dalle correnti marine, dal vento e dal moto ondoso e le trasformazioni fisico-chimiche subite dalla macchia stessa. La macchia d'olio viene suddivisa in un gran numero di particelle, circa 100.000, usando una rappresentazione lagrangiana. Ogni particella è trasportata per effetto dei processi avvettivi (correnti, vento e onde) e dalla diffusione turbolenta. Inoltre l'intera macchia d'olio subisce i processi di trasformazione chimico-fisici.

Concettualmente il modello si basa sull'equazione utilizzata per i traccianti che permette di comprendere il loro tasso di cambiamento di concentrazione:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \cdot \nabla C = \nabla \cdot (k \nabla C) + \sum_{j=1}^M r_j(x, C(x, t), t) \quad (1)$$

dove  $C(x, y, z, t)$  è la concentrazione del tracciante descritta in funzione delle coordinate spaziali e temporali,  $U$  è il flusso medio espresso nelle componenti  $(U, V, W)$ ,  $K$  è il tensore di diffusività che parametrizza gli effetti turbolenti;  $U \cdot \nabla C$  rappresenta l'avvezione,  $\nabla \cdot (k \nabla C)$  la diffusione turbolenta.

A ogni istante la particella subisce uno spostamento avvettivo e diffusivo; l'equazione della traiettoria è:

$$dx_k(t) = [U_C(x_k, y_k, t) + U_W(x_k, y_k, t) + U_S(x_k, y_k, t)] dt + dx'_k(t) \quad (2)$$

dove:

$dx'_k(t)$  e  $dy'_k(t)$  è il trasporto turbolento

$U_C$  è la velocità delle correnti fornita dai modelli oceanografici,

$U_S$  è la correzione delle onde, ovvero lo Stokes'drift che nel mio caso considero però essere nullo  $U_S = 0$ ,

$U_W$  è la correzione dovuta al vento che può essere scritta come:

$$U_W = \alpha (W_x \cos \beta + W_y \sin \beta) \quad (3)$$

$$V_W = \alpha (-W_x \sin \beta + W_y \cos \beta)$$

dove  $\alpha$  rappresenta il drift factor e  $\beta$  il drift angle e  $(W_x, W_y)$  sono le componenti del vento.

I termini della diffusione turbolenta son scritti come:

$$dx'_k(t) = Z_1 \sqrt{2K_x dt} = [2r - 1] \sqrt{6K_h dt} \quad (4)$$

$$dy'_k(t) = Z_2 \sqrt{2K_y dt} = [2r - 1] \sqrt{6K_h dt}$$

$$dz'_k(t) = Z_3 \sqrt{2K_z dt} = [2r - 1] \sqrt{6K_v dt}$$

con  $K_h$  e  $K_v$  diffusività verticale e orizzontale e rispettivamente pari a 2 e  $0,01m^2/s$ ,  $r$  è un numero random tra 0 e 1.

Oltre però ai processi di diffusione e di avvezione, l'olio cambia il suo stato anche in seguito a processi di trasformazione chimico-fisica. Una parte dell'olio è infatti persa per evaporazione, un'altra è dispersa nella colonna d'acqua o coinvolta nel processo di emulsificazione. I processi di trasformazione simulati da MEDSLIK II sono l' evaporazione, la dispersione, lo spreading e l'emulsificazione. Per simulare tali processi il volume dell'olio è rappresentato come composto dal volume della parte sottile  $V^{TN}$  e dal volume della parte spessa  $V^{TK}$ :

$$V_s(x_T, y_T, t) = V^{TN}(x_T, y_T, t) + V^{TK}(x_T, y_T, t) \quad (5)$$

Il tasso di variazione del volume d'olio è risolto per la parte sottile e per la parte spessa:

$$\frac{dV^{TK}}{dt} = \frac{dV^{TK}}{dt} |_{(E)} + \frac{dV^{TK}}{dt} |_{(D)} + \frac{dV^{TK}}{dt} |_{(S)} \quad (6)$$

$$\frac{dV^{TN}}{dt} = \frac{dV^{TN}}{dt} |_{(E)} + \frac{dV^{TN}}{dt} |_{(D)} + \frac{dV^{TN}}{dt} |_{(S)}$$

dove  $S$  rappresenta la parte relativa allo spreading,  $D$  la parte relativa alla dispersione e  $E$  l'evaporazione.

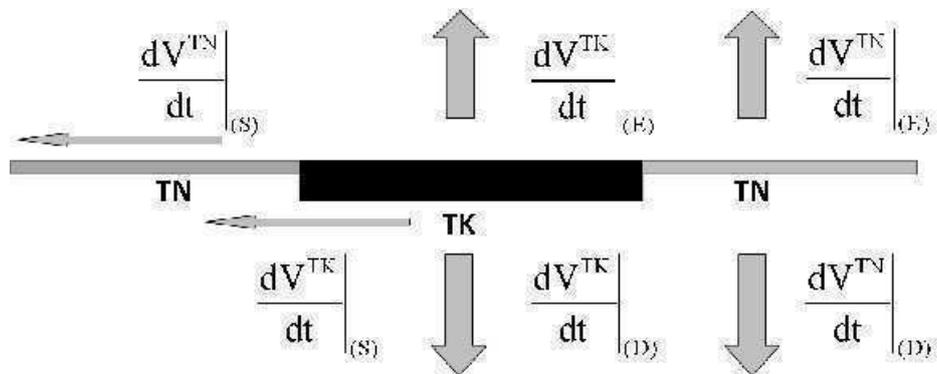


Figura 17: Modello di movimento dell'olio

I parametri che caratterizzano le simulazioni effettuate sono:

**Drift Factor** ( $\alpha$ ) che rappresenta la percentuale di vento da aggiungere alla velocità di corrente. Nel nostro caso  $\alpha$  è sempre pari a 0 e quindi non c'è la correzione dovuta al vento.

**Horizontal diffusivity** scelto pari ad un valore di riferimento di  $2m^2/s$ .

**Vertical diffusivity** avente valore di  $0,01 m^2/s$  al di sopra del termoclino la cui profondità si trova a  $30m$ , e di  $0,0001m^2/s$  al di sotto.

**Number of parcels** che rappresentano la densità dell'olio; maggiore è il numero di particelle migliore è la rappresentazione della macchia di olio. In questo caso vengono utilizzate 90.000 particelle.

**Depth of currents** considerate essere solo quelle superficiali.

**Interfaccia grafica di MEDSLIK II** Nell'interfaccia di inserimento dei dati di input è possibile scegliere il modello oceanografico che fornisce i campi di corrente come il Mediterranean Forecasting System (MFS) e Adriatic Forecasting System (AFS) e il forzante di vento ECMWF 0,25.

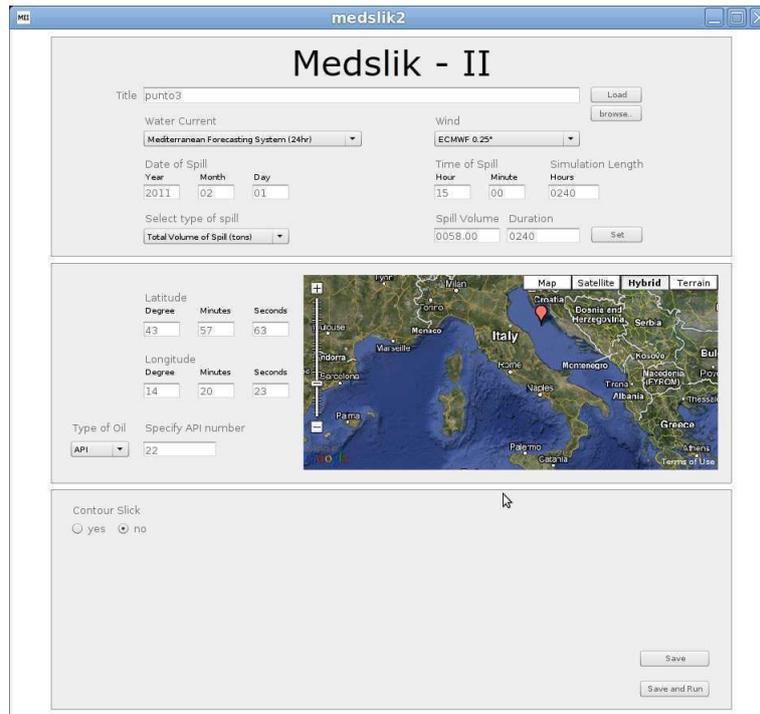


Figura 18: Schermata iniziale di MedslikII

Si procederà poi con l'inserimento dei dati di input necessari per l'esecuzione di una simulazione:

- **Date of spill:** anno, mese e giorno relativi al versamento;
- **Time of spill:** ora del giorno in cui ha inizio il versamento;
- **Simulation Length:** numero di ore di simulazione;
- **Select tipe of oil:** esso permette di scegliere tra due opzioni: Spill rate oppure Total volume of spill. Selezionando "Spill Rate" si considera un versamento continuo e si inserisce la portata del versamento espresso in ton/hr e la durata del versamento. Utilizzando "Total volume of spill" si assume un versamento istantaneo e si inserisce il volume totale

di olio sversato in ton. In entrambi i casi deve essere ulteriormente espressa la durata del versamento;

- **Latitude e Longitude:** gradi, minuti e secondi riguardanti il luogo di inizio versamento;
- **Type of oil:** permette di scegliere il tipo di olio che si vuole utilizzare in base al numero API (tra 17 e 45) o al nome dell'olio (circa 200 oli differenti).

In queste simulazioni si sono utilizzati campi di corrente sia relativi al Mediterraneo (MFS) che all'Adriatico (AFS) in modo da analizzare la sensitività dei risultati alla differente risoluzione. Si è impostata l'opzione Total Volume of Spill e una tipologia di olio avente un API di 22.

## 2.2 Esperimento di simulazione di dispersione di idrocarburi a mare

### 2.2.1 Descrizione del disegno sperimentale

Per definire l'area di studio e la rotta navale da prendere come campione per svolgere l'esperimento ci siamo serviti dei dati sulla densità di traffico media per l'anno 2011 relativa al Mar Adriatico fornitaci dalla Guardia Costiera Italiana.

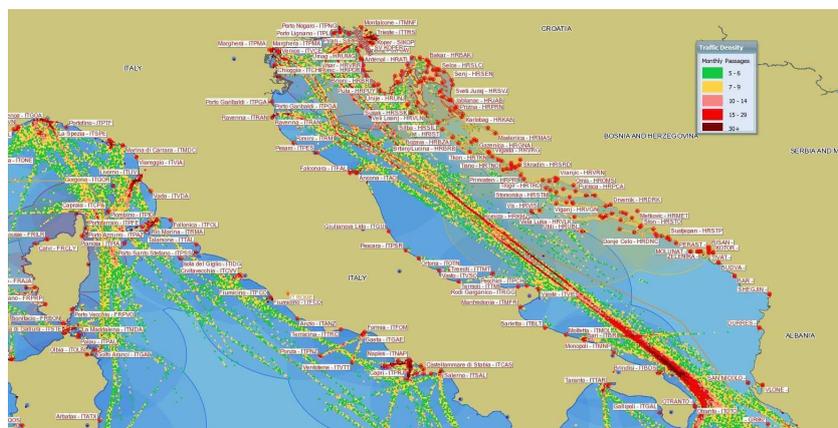


Figura 19: Dati relativi alla densità di traffico in Italia fornita dalla Guardia Costiera Italiana (fonte Guardia Costiera Italiana)

Sulla base di tale mappa abbiamo individuato la rotta di nostro interesse, che corrisponde anche alla principale rotta di trasporto del Mar Adriatico. Tali rotte interessano i porti di Brindisi, Venezia e Trieste. La rotta ha una lunghezza media di circa 450 miglia e risulta quindi percorribile in un giorno da navi aventi una velocità di crociera da 6,2 a 1,3 m/s.

Il rilascio del petrolio è stato definito identificando dei singoli punti di rilascio lungo la rotta. Tali punti sono presi a distanza di 100 miglia l'uno dall'altro. Il quantitativo di petrolio trasportato lungo la rotta è stato calcolato sulla base dei dati presenti all'interno della relazione del 2011 dell'Unione Petrolifera dove si stima il quantitativo di petrolio che annualmente raggiunge i maggiori porti italiani.

**ITALIA LA STIMA DEGLI ARRIVI DI PETROLIO GREGGIO NEI PORTI**  
(Migliaia di tonnellate)

	1990	1995	2000	2005	2007	2008	2009	2010
Augusta (Siracusa)	11.010	12.390	14.200	14.530	14.650	14.090	9.990	11.320
Cagliari	12.050	12.130	13.200	14.605	14.645	15.495	13.245	14.345
Falconara (Ancona)	2.850	3.340	3.300	3.365	3.525	3.520	3.370	3.250
Fiumicino (Roma)	3.310	3.680	3.580	4.030	3.645	4.095	3.565	3.330
Gela (Caltanissetta)	3.570	3.840	2.590	2.050	2.480	2.710	1.645	2.110
Genova - Mulledo (*)	20.320	18.600	14.160	15.605	15.020	14.720	14.470	13.700
La Spezia	130	5	-	-	-	-	-	-
Livorno	3.700	3.175	3.710	4.240	4.665	4.175	3.345	4.550
Milazzo (Messina)	4.400	4.730	6.910	7.385	7.590	6.680	6.740	7.760
Napoli	3.620	-	-	-	-	-	-	-
Priolo Mellilli (Siracusa)	6.600	8.550	8.850	11.145	8.345	5.805	8.040	7.570
Ravenna	270	235	60	40	140	135	165	165
Savona -Vado Ligure	5.050	5.790	6.490	7.235	7.460	6.960	6.635	5.955
Taranto	3.305	3.405	2.530	1.420	2.225	995	1.640	1.480
Trieste (*)	25.865	27.190	34.520	36.990	33.590	35.650	33.965	34.500
Venezia Porto Marghera	4.210	4.940	5.600	5.760	6.370	5.580	5.785	5.630
<b>TOTALE</b>	<b>110.260</b>	<b>112.000</b>	<b>119.700</b>	<b>128.400</b>	<b>124.350</b>	<b>120.610</b>	<b>112.600</b>	<b>115.665</b>

(\*) Sono compresi i greggi movimentati attraverso l'oleodotto CEL fino al 1996 (dal 1997 chiuso il tratto Genova-Ingolstadt).

(\*) Sono compresi i greggi movimentati attraverso l'oleodotto TAL.

Fonte: Elaborazione Unione Petroliera

Figura 20: Stima degli arrivi di greggio nei porti italiani(Unione Petrolifera 2011)

Abbiamo considerato nell'esperimento, non una nave reale avente velocità definita, bensì una virtuale presupponendo che contemporaneamente in ogni punto della nostra traccia, nel momento da noi simulato vi sia un'ipotetica nave che sversi il quantitativo di petrolio da noi stabilito. Nell'esperimento si è fatto uso di un idrocarburo avente un API pari a 22, numero ottenuto come media tra tutti i vari oli e soprattutto come uno dei più comuni oli trasportati ad esempio l'*Arabian havey Crude*, esso corrisponde a un olio mediamente pesante caratterizzato da una densità di  $0,919 \text{ kg/m}^2$ .

**Tabella dell'esperimento** Per procedere quindi con il disegno sperimentale abbiamo usato:

- La lunghezza della rotta espressa in miglia
- La quantità totale di greggio arrivata nei porti italiani in un anno, ottenuta dai dati dell'Unione Petrolifera. I porti di nostro interesse (Venezia e Trieste) sono rappresentati dai punti finale della traccia da noi scelta e la quantità totale di petrolio arrivata in tale porto la indichiamo con  $Q_{tot}$ .

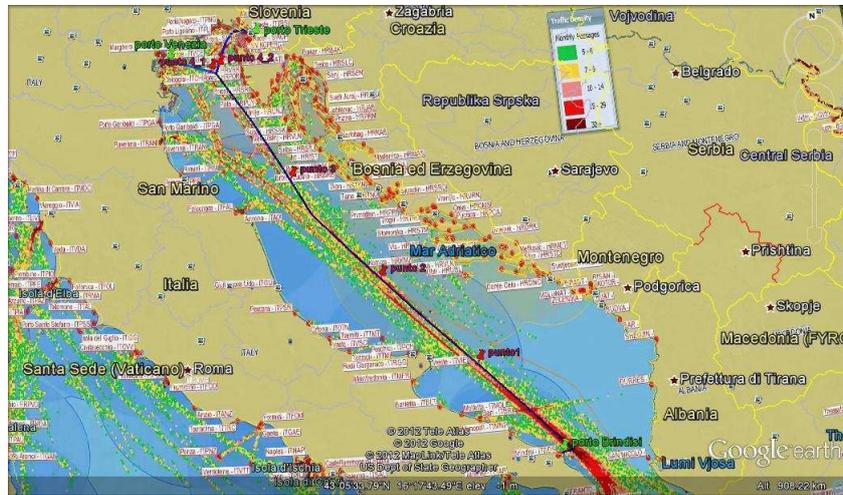


Figura 21: Immagine relativa alla traccia e ai punti di rilasci considerati

Gli esperimenti che saranno svolti avranno le seguenti caratteristiche:

- numero di punti di rilascio  $Nr$ : un punto ogni 100 miglia,  $Nr = 5$
- numero di rilasci: 3 al mese, nei giorni 1, 10 e 20. Considerando un mese per ogni stagione (Febbraio, Maggio, Agosto, Novembre) risultano 12 rilasci in ognuno dei punti in cui è stata suddivisa la traccia.
- il rilascio di petrolio in ogni punto della traccia è simulato come un versamento continuo con una durata  $D$  uguale a 10 giorni.

Per ottenere  $Q_{svers}$ , ovvero il versamento operato dalle navi lungo le tracce, abbiamo moltiplicato il dato relativo a  $Q_{tot}$ , fornito dall'Unione Petrolifera,

per un fattore moltiplicativo pari a  $2,14 * 10^{-4}$  definito nell'esperimento condotto da Kyriaki Glyptou (comunicazione personale di Darko Domovic del REMPEC ).

$$Q_{svers} = Q_{tot} \times 2,14 * 10^{-4}$$

Tale valore viene poi suddiviso per il numero di giorni in un anno e per il numero di punti di rilascio da noi considerati ( $Nr$ ) e moltiplicato per la durata del versamento ( $D$ ); in modo da ottenere la quantità di petrolio rilasciata in ogni punto ( $Qr$ ).

$$Qr = \frac{Q_{svers} D}{365Nr}$$

	A	B
Estremi della traccia	Brindisi-Trieste	Brindisi-Venezia
Lunghezza rotta (miglia)	454,33	426,77
Quantità di olio rilasciata per traccia (tons)	7383	1203
Numero punti di rilascio	4(punti 1-2-3-5)	4(punti 1-2-3-4)
Quantità di olio rilasciata in ogni punto per 10 giorni (tons) (usata per la simulazione)	50,5	8,20

Tabella 1: tabella relativa ai dati necessari per la simulazione

Per i primi 3 punti, comuni ad entrambe le tracce, si utilizza per la simulazione un quantitativo d'olio pari alla somma dei versamenti di entrambe le tracce di 58,7 ton. Per quanto riguarda i punti 4 e 5, caratteristici di ogni porto, si usano i quantitativi relativi al singolo punto (50,5 tons o 8,20 tons)

Abbiamo effettuato gli esperimenti sia con i dati di corrente relativi al modello del Mediterraneo, sia con quelli relativi all'Adriatico per vedere come questi differivano. Già per quanto riguarda gli output del modello di MED-SLIK II si nota che la distribuzione dell'idrocarburo e la sua dispersione nel corso dei 10 giorni di simulazione subisce delle trasformazioni differenti. Per quanto riguarda infatti gli output relativi all'Adriatico, essi subiscono spostamenti dipendenti da correnti di intensità maggiore rispetto a quello che si ottiene utilizzando MFS.

Prendendo come esempio il punto 5 della traccia e la simulazione partita il giorno 10/02/2011 si nota che già nel primo giorno di simulazione sono presenti delle differenze tra i due modelli di corrente. Queste differenze, come precedentemente spiegato, sono imputabili alle differenti risoluzioni dei due modelli che implicano quindi correnti di diversa intensità; si può peraltro dire che le simulazioni attuate utilizzando il modello AFS siano caratterizzate da correnti più forti e turbolente rispetto a quelle ottenute tramite i dati MFS.

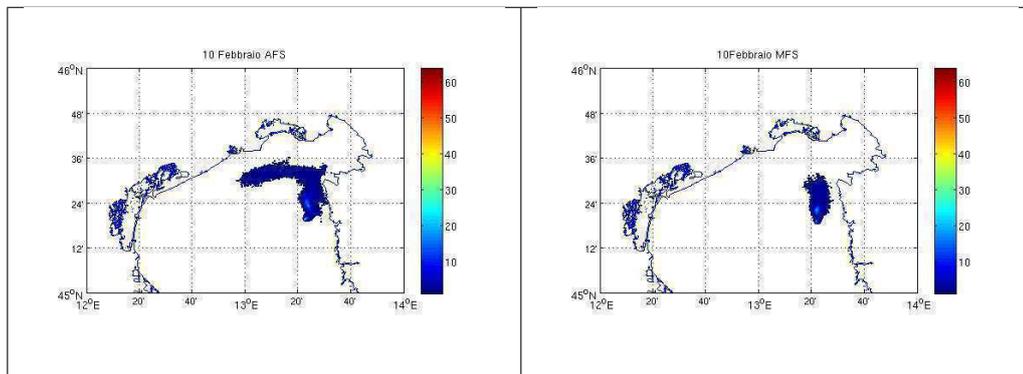


Figura 22: A destra si osserva la distribuzione di idrocarburo dopo 10 giorni di simulazione utilizzando AFS; a sinistra la distribuzione utilizzando MFS. Si nota come la concentrazione di idrocarburo subisca una dispersione differente dovuta alla differenza di risoluzione dei modelli.

**Creazione mappe di pericolosità** Per ottenere le mappe di pericolosità relative ai mesi di Febbraio, Maggio, Agosto e Novembre riguardo la traccia considerata abbiamo lavorato utilizzando degli script di MATLAB in grado di crearci tali mappe. Per prima cosa, come precedentemente detto, per ogni mese scelto son state effettuate 3 simulazioni nei giorni 1, 10 e 20. Tali simulazioni, riguardante la dispersione dell'olio in mare, son state fatte proseguire per i 10 giorni successivi alla data di inizio in modo da ottenere un andamento completo del mese complessivo di 30 giorni. Tale considerazione è stata attuata per ogni punto di rilascio lungo la traccia. Si hanno così i 5 punti di rilascio della traccia aventi ognuno 3 simulazioni con un andamento di 10 giorni ciascuno. Per procedere nell'ottenimento delle mappe ci si muove come segue.

- Si aggregano i dati di concentrazione relativi ai vari punti della traccia in modo da ottenere un unico file mensile con andamento giornaliero. Si ha in questo modo un file comprensivo di tutte le concentrazioni dei 30 giorni di simulazione.
- Si attua un'aggregazione spaziale in modo da ottenere una mappa mensile contenente tutti i punti considerati. Lo script utilizzato riporta le concentrazioni di tutti i punti della traccia su un grigliato regolare.

Dai risultati delle simulazioni abbiamo così un campo di concentrazione per ogni giorno del mese per tutto il mare Adriatico (risultante dall'aggregazione spaziale dei risultati delle simulazioni sui 5 punti della traccia) e da questo ne calcoliamo l'anomalia in modo da visualizzare i valori superiori alla media chiamiamo il campo di anomalia  $C_{DAY}(x, y) - \bar{C}$ , con  $\bar{C}$  che rappresenta la concentrazione media relativa a ogni mese.

L'indice di pericolosità o frequenza di accadimento degli eventi,  $I$ , è definito quindi:

- se  $C_{DAY}(x, y) - \bar{C} > S$  allora  $P_{DAY}(x, y) = 1$
- se  $C_{DAY}(x, y) - \bar{C} < S$  allora  $P_{DAY}(x, y) = 0$

$$I(x, y) = 100 \cdot \frac{\sum_{DAY=1}^N P_{DAY}(x, y)}{N}$$

dove

$P_{DAY}(x, y)$  è un indice che assume valore 1 se la concentrazione è maggiore della soglia di riferimento oppure 0 se la concentrazione è minore dalla

soglia.  $N$  è il numero di giorni del mese;  $S$  è la soglia di riferimento che considero pari a 0.

I giorni di simulazione utilizzati, come detto precedentemente, sono 30; questo preclude una determinazione veritiera e affidabile delle probabilità di superamento della soglia in quanto il limite di confidenza è calcolato solo per i 30 dati ottenuti e può essere quindi affetto da errori. Se fossimo in possesso di più dati avremmo invece la certezza di non cadere al di fuori dei limiti.

## Capitolo 3

### 3 Risultati

#### 3.1 Mappe di Pericolosità

Le mappe risultanti permettono di valutare la probabilità di superamento della soglia di riferimento e quindi la probabilità di trovare zone caratterizzate dalla presenza dell'idrocarburo e valutare la sua dispersione nell'arco dei 30 giorni simulati. Per quanto riguarda l' utilizzo dei due modelli di corrente, si riscontrano subito differenze rilevanti tra i risultati ottenuti. I risultati appartenenti al modello MFS sono a bassa risoluzione rispetto a quelli del modello AFS ad alta risoluzione. La bassa risoluzione data dal modello Mediterranean Forecasting System è di  $1/16 \cdot 1/16^\circ$  e arriva a circa 6 km, mentre quella dell'Adriatical Forecasting System è di  $1/45^\circ$  e raggiunge i 2 km.

Tra i vari mesi si notano le differenze conseguenza della diverse correnti che durante il corso dell'anno si alternano nell'Adriatico.

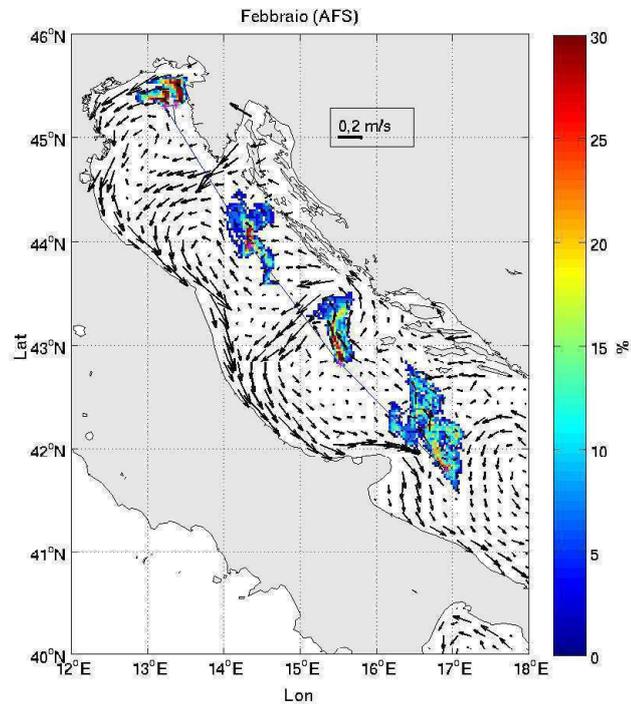


Figura 23: Mappa di pericolosità riguardante il mese di Febbraio 2011 utilizzando il modello di correnti AFS. I colori rappresentano la percentuale di eventi caratterizzati da concentrazione di olio maggiore della soglia di riferimento. I vettori sono le correnti medie del mese di Febbraio.

Nel mese di Febbraio 2011 (figura23) si osserva una marcata tendenza dell'olio a seguire il giro ciclonico attribuibili alle correnti superficiali in prossimità delle coste albanesi, senza però mai raggiungere la zona costiera. La maggiore dispersione di idrocarburo viene identificata nella zona meridionale del bacino, nel quale però si riscontra anche una minore percentuale di superamento in quanto l'olio è più disperso e meno concentrato. Nella parte settentrionale la concentrazione dell'idrocarburo risulta invece più elevata e rimanendo localizzata nelle vicinanze dei punti di versamento provoca una pericolosità maggiore.

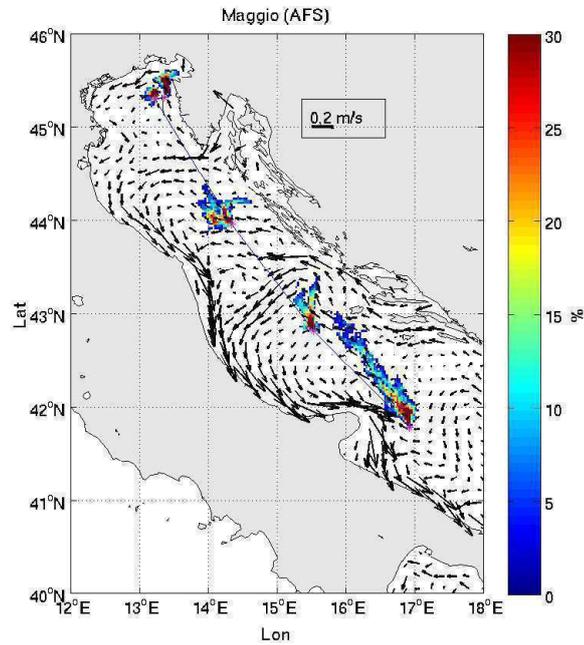


Figura 24: Mappa di pericolosità riguardante il mese di Maggio 2011 utilizzando il modello di correnti AFS. I colori rappresentano la percentuale di eventi caratterizzati da concentrazione di olio maggiore della soglia di riferimento. I vettori sono le correnti medie del mese di Maggio.

Nel mese di Maggio (figura24) la distribuzione dell'olio è sempre caratterizzata dall'andamento delle correnti. Si nota però, vicino al golfo di Trieste, una minore dispersione che permette alla macchia di non raggiungere le coste.

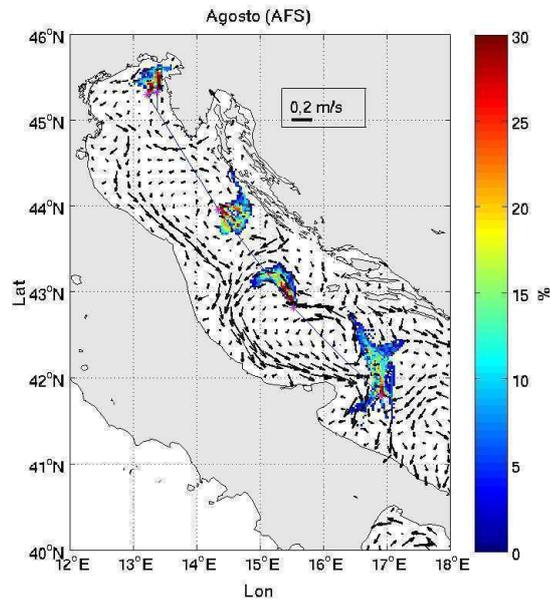


Figura 25: Mappa di pericolosità riguardante il mese di Agosto 2011 utilizzando il modello di correnti AFS. I colori rappresentano la percentuale di eventi caratterizzati da concentrazione di olio maggiore della soglia di riferimento. I vettori sono le correnti medie del mese di Agosto.

Per quanto riguarda il mese di Agosto (figura25), nella parte meridionale si nota la comparsa del gyro centro-meridionale che porta l'idrocarburo ad spostarsi verso la costa occidentale fino quasi, nella parte meridionale del gyro, ad avvicinarsi al promontorio del Gargano. Vicino alla Croazia la macchia di olio riesce poi quasi a raggiungere le coste. Durante il mese di Novembre, come da figura26, si osserva la macchia di petrolio subire una forte deflessione provocata dal gyro che nei mesi autunnali si sviluppa maggiormente. Si notano infatti, nella zona centro-meridionale, correnti molto più intense rispetto alle altre stagioni. Nella zona settentrionale, in prossimità della città di Trieste, in tutti i mesi considerati e soprattutto nella stagione autunnale, le correnti portano l'olio fino alle zone costiere provocando un elevato rischio per l'ambiente e per l'intero ecosistema limitrofo.

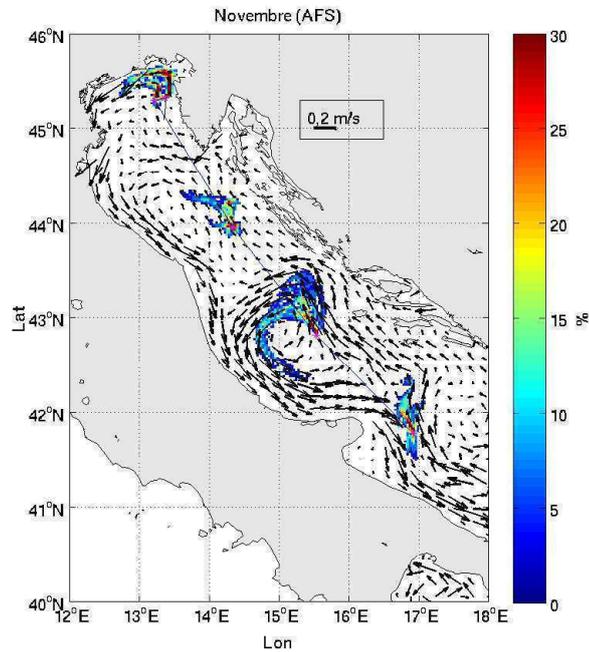


Figura 26: Mappa di pericolosità riguardante il mese di Novembre 2011 utilizzando il modello di correnti AFS. I colori rappresentano la percentuale di eventi caratterizzati da concentrazione di olio maggiore della soglia di riferimento. I vettori sono le correnti medie del mese di Novembre.

Il golfo di Trieste è infatti una delle zone più inquinate dell'intero bacino e l'intenso traffico marittimo ne aumenta la pericolosità. Si nota inoltre come, nelle zone settentrionali, la macchia segua l'andamento della corrente nord adriatica e torni verso sud lungo la fascia occidentale del bacino.

Per quanto riguarda invece le mappe ottenute con il modello MFS si nota una minore dispersione dell'olio dovuto alla minore intensità delle correnti. Esse infatti, avendo una risoluzione più bassa, sono caratterizzate solamente dalla parte media e non dalle varie turbolenze che possono essere invece riscontrabili nel modello AFS, risultando spesso anche molto diverse. Inoltre, sempre a causa della minore risoluzione, la macchia rappresentante la concentrazione di idrocarburo viene visualizzata attraverso pixel di dimensioni maggiori.

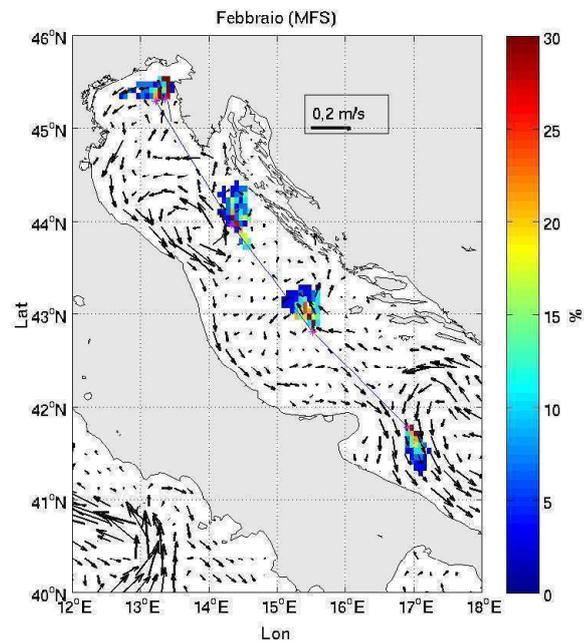


Figura 27: Mappa di pericolosità riguardante il mese di Febbraio 2011 utilizzando il modello di correnti MFS. I colori rappresentano la percentuale di eventi caratterizzati da concentrazione di olio maggiore della soglia di riferimento. I vettori sono le correnti medie del mese di Febbraio.

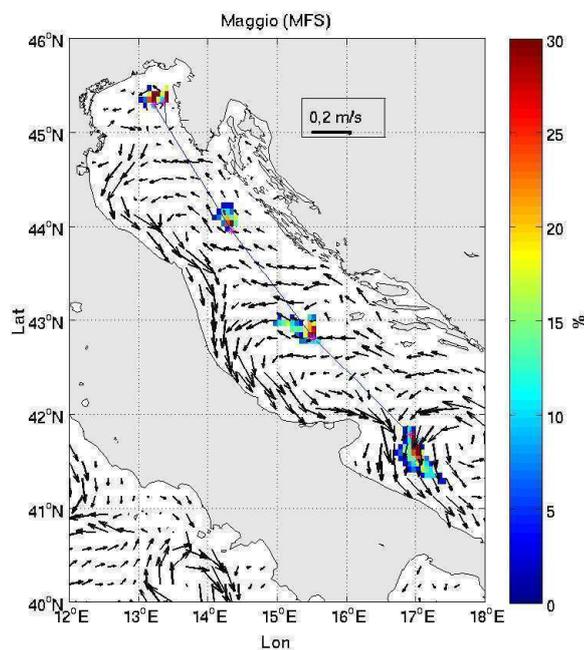


Figura 28: Mappa di pericolosità riguardante il mese di Maggio 2011 utilizzando il modello di correnti MFS. I colori rappresentano la percentuale di eventi caratterizzati da concentrazione di olio maggiore della soglia di riferimento. I vettori sono le correnti medie del mese di Maggio.

La dispersione dell'olio è sempre caratterizzata dalle correnti presenti. Si nota così che la concentrazione dell'idrocarburo rimane molto relegata alla traccia di percorrenza, dove si riscontrano tra l'altro, i punti a più alta probabilità di superamento della soglia. Durante il mese di Febbraio (figura 27), si nota la macchia di petrolio situata più a sud spostarsi verso le coste pugliesi, cosa riscontrabile anche nel mese primaverile (figura 28)

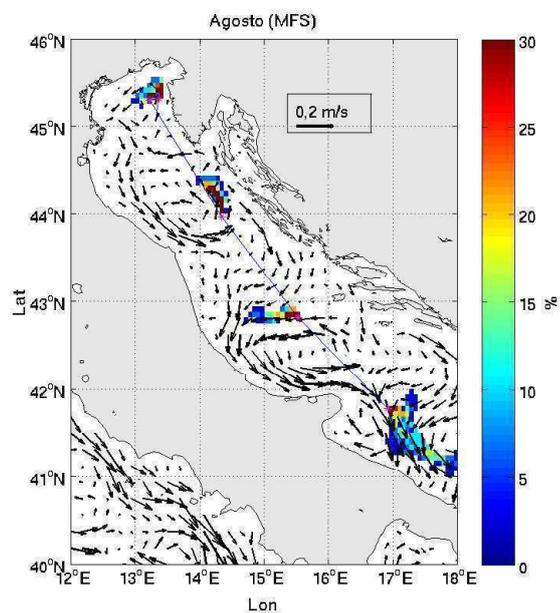


Figura 29: Mappa di pericolosità riguardante il mese di Agosto 2011 utilizzando il modello di correnti MFS. I colori rappresentano la percentuale di eventi caratterizzati da concentrazione di olio maggiore della soglia di riferimento. I vettori sono le correnti medie del mese di Agosto.

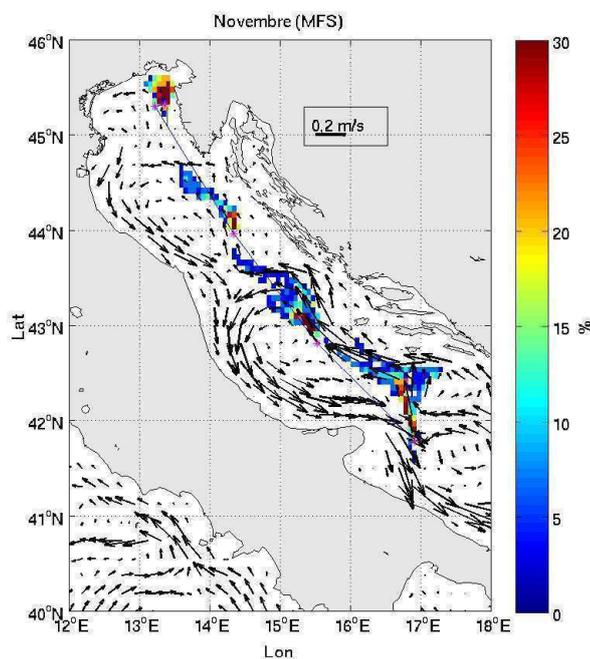


Figura 30: Mappa di pericolosità riguardante il mese di Novembre 2011 utilizzando il modello di correnti MFS. I colori rappresentano la percentuale di eventi caratterizzati da concentrazione di olio maggiore della soglia di riferimento. I vettori sono le correnti medie del mese di Novembre.

Soprattutto in Agosto però (figura 29) si nota come l'olio segua la corrente in uscita dal bacino. Gli altri punti di versamento risultano invece caratterizzati da un limitato spostamento. Per quanto riguarda il mese di Novembre (figura 30) si nota che, in tutti i punti considerati, l'olio si propaga in modo maggiore rispetto ai mesi precedenti, in seguito a una maggiore intensità delle correnti superficiali e che lo spostamento è caratterizzato da un andamento che segue la corrente lungo la costa orientale fino quasi a formare un' unica scia.

Si notano quindi, attraverso le mappe realizzate, notevoli differenze stagionali dovute agli effetti delle correnti per quanto riguarda entrambi i modelli e soprattutto sono da notare le marcate divergenze tra gli andamenti delle macchie in base all'utilizzo dei diversi modelli di corrente.



## Capitolo 4

### 4 Conclusioni

Il lavoro svolto in questa tesi mostra come, grazie ad un modello numerico accoppiato a modelli di corrente, si possa riuscire a prevedere lo spostamento e la trasformazione di macchie di idrocarburi a mare. Si possono in questo modo effettuare simulazioni e valutare quindi come gestire più efficacemente il rischio. Nel caso studiato si osserva come ci siano delle relazioni tra lo spostamento dell'idrocarburo, le correnti marine e la traccia navale considerata. Si nota infatti che:

- le correnti caratterizzanti la fascia centrale del bacino adriatico, non facciano mai, secondo la nostra simulazione, arrivare l'idrocarburo fin in prossimità della costa, a parte nei pressi del golfo di Trieste.
- le mappe di pericolosità prodotte risentono della variabilità spaziale e temporale delle correnti.
- le zone a più elevata pericolosità risultano sempre limitrofe al punto di versamento
- le differenze di risoluzione tra i modelli di corrente portino ad una diversa stima della pericolosità.

Da questi dati è possibile ricavare eventuali rotte più consone alla navigazione, che mantengano l'imbarcazione lontano dalla costa in modo da provocare una limitata probabilità di inquinamento. In futuro è auspicabile analizzare il danno per potere calcolare il rischio per le varie attività presenti nell'Adriatico, dalla pesca alle aziende turistiche.

## 5 Bibliografia

- A. Artegiani, D. Bregant, E. Paschini, N. Pinardi, F. Raicich, A. Russo. *The Adriatic Sea General Circulation Part 1: Air-Sea Interaction and Water Mass Structure*. Journal of physical Oceanography, 1997.
- I. M. Aprioku. *Collective response to oil spill hazard in the Eastern Niger delta of Nigeria*. Journal of Environmental Planning and Management, pp389, 1999.
- Almonti C. *Trasporto di Greggio via mare*. Vol1, Esplorazione, Produzione e Trasporto.
- U. Biliardo, G. Mareddu. *Traffico petrolifero e sostenibilità ambientale*. Unione Petrolifera 350p. 2004.
- G. Coppini, N. Pinardi, M. Cutarella, Glyptou K., N. Fabbroni. *Risk assessment of operational oil releases in the Adriatic Sea, in the Tyrrhenian Sea, Ligurian Sea and in the Sicily Strait*.
- G. Coppini, M. DeDominicis, G. Zodiatis, R. Laedner, N. Pinardi, R. Santoleri, S. Colella, F. Bignami, D.R. Hayes, D. Soloviev, G. Georgiou, G. Kallos. *Hindcast of oil spill pollution during the Lebanon crisis in the Eastern Mediterranean, July-August 2006*. Marine pollution Bulletin, pp 140-153, 2011.
- Dobricic, S., N. Pinardi, M. Adani, M. Tonani, C. Fratianni, A. Bonazzi e V. Fernandez, 2007. Daily oceanographic analyses by Mediterranean Forecasting System at the basin scale. Ocean Sci, 3, 149-157.
- M. Grifoll, G. Jordà, A. Borja, M. Espino. *A new risk assessment method for water quality degradation in harbour domains, using hydrodynamic models*. Marine Pollution Bulletin, 60, pp 69-78, 2010.
- G. Guillen, G. Rainey, M. Morin. *A simple rapid approach using coupled multivariable statistical methods, GIS and trajectory models to delineate areas of common oil spill risk*. Journal of Marine System, 45, pp 221-235, 2004.

- M. Hussein, A. Amer, A. El-Maghraby, N.A. Taha. *Availability of barley straw application on oil spill clean up*. Int.J.Environ.Sci.Tech. 6(1), pp123-130, 2009.
- ITOPF. *Fate of marine oil spills*. Technical information Paper, 2002.
- ITOPF. *Oil spill statistics*. Brochure 2011.
- Legambiente. *MareaNera. Mappa del rischio derivante dal traffico e dalla movimentazione petrolifera in Italia*. La Spezia, 2010.
- K. Lee. *Oil Particle, interactions in aquatic environments: influence on the transport, fate, effect and remediation of oil spill*. Spill Science and Technology Bulletin, V.8, pp 3-8, 2002.
- R.R. Lessard, G. Demarco. *The significance of oil spill Dispersant*. Spill Science and Technology Bulletin, V.6, pp 59-68, 2000.
- B. Mazzarotta, R. Bubbico, S. Bonuicini, G. Spadoni. *Definizione di un indice di rischio per il trasporto di merci pericolose*.
- Manuale d'uso di MEDSLIK II.
- P. Oddo, N. Pinardi, M. Zavatarelli, A. Coluccelli. *The Adriatic Basin forecasting system*. ActaAdriat, 74, pp 169-184, 2006.
- I. Oddi. *Il grande disastro ecologico della petroliera MT Haven, Genova 1991*. 2010.
- Oil Spill Responce. *The definition of risk and its component*. Medexpol, 2011.
- A. Olita, A. Cuccè, S. Simeone, A. Ribotti, L. Fazioli, B. Sorgente, R. Sorgente. *Oil spill hazard and risk assessment for the shorelines of a Mediterranean coastal arcipelago*. Ocean and Coastal Management, 57, pp 44-52, 2012.
- N. Pinardi, E. Arnieri, A. Criso, M. Ravaioli, M. Zavatarelli. *The physical and ecological structure and variability of shelf areas in the Mediterranean Sea*. "The Sea" Vol 14, chapter 32.

- J. Price, M. Reed, M.K. Howard, W.R. Johnson, ZhenGang J., G.F. Marshall, N.L. Guinasso, G.B. Rainey. *Preliminary assessment of an oil spill trajectory model using satellite tracked oil-spill-simulation drifters*. Environmental modelling and Software, 21, pp 258-270, 2006.
- J. Price, W.R. Johnson, ZhenGang J., G.F. Marshall, G.B. Rainey. *Overview of the Oil Spill Risk Analysis (OSRA) model for environmental impact assessment*. Spill science and Technology Bulletin, V.8, pp 529-533, 2003.
- G. Psarros, R. Skjong, E. Vanem. *Risk acceptance criterion for tanker oil spill risk reduction measures*. Marine Pollution Bulletin, 62, pp 116-127, 2011.
- REMPEC. *Protecting the Mediterranean against maritime accidents and illegal discharges*. Brochure, 2002.
- REMPEC. *Statistical analysis. Alerts and accidents database*. 2011
- G. Salei. *Imparare dalle catastrofi: disastri navali e incidenti petroliferi*. Storia e futuro, rivista di storia e storiografia, n27, 2011.
- S. Teggi. *Analisi di rischio*. Facoltà di ingegneria di Modena, 2008-2009.
- M. Tonani, N. Pinardi, M. Adani, A. Bonazzi, G. Coppini, M. DeDominicis, S. Dobrocic, M. Drudi, N. Fabbroni, C. Fratuanni, A. Grandi, S. Lyubartsev, P.Oddo, D. Pettenuzzo, J. Pistoia, I. Pujol. *The Mediterranean ocean forecasting system*.
- M. Vaccari. *Applicazione dell'analisi assoluta di rischio ai siti contaminati*. Università degli studi di Brescia. Dipartimento di ingegneria civile, architettura, territorio e ambiente.
- Unione Petrolifera. *Relazione annuale 2011*.
- M. Zavatarelli, J.W. Baretta, J.G. Baretta-Bekker, N. Pinardi. *The dynamics of the Adriatic Sea ecosystem. An idealized model study*. Deep-Sea Research 1, 47, pp 937-970, 2000.

- G. Zodiatis, R. Lardner, D.R. Hayes, D. Soloviev, G. Georgiou. *The succesful application of the Mediterranean oil spill model in assisting EU decision makers during the oil pollution crisis of Lebanon in summer 2006*. Rapp. Comm. int. Mer Medit., 38, 2007.
- WWF/Legambiente. *I traffici marittimi petroliferi, regole, strumenti, soluzioni. Riflessioni a dieci anni dall'incidente Haven*. 2001.

Siti Internet:

- [www.gesamp.org](http://www.gesamp.org)
- [www.itopf.com](http://www.itopf.com)
- [www.marinetraffic.com](http://www.marinetraffic.com)
- [www.noaa.gov](http://www.noaa.gov)
- [www.oilrigdisasters.co.uk](http://www.oilrigdisasters.co.uk)
- [www.oilspillsolution.org](http://www.oilspillsolution.org)
- [www.osdife.org](http://www.osdife.org)
- [www.rempec.org](http://www.rempec.org)

