

Relazione Scientifica

Teodosio Lacava

Istituto di Metodologie per l'Analisi Ambientale (IMAA)

Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR)

Titolo del programma:

Sperimentazione di metodologie avanzate di dati satellitari per l'individuazione e il monitoraggio degli *oil spill*

Dipartimento di afferenza:

Terra ed Ambiente

Istituto ospitante:

Masdar Institute of Science and Technology (MIST), Masdar City (Abu Dhabi -UAE)

Durata:

21 giorni: 22/11/2015 – 12/12/2015

Sommario

I	Introduzione	3
II	Le Metodologie	5
	II.a La tecnica "RST-OIL"	6
	II.b La tecnica "MIST"	11
III	L'area di studio	15
IV	Il caso di studio	17
V	I risultati	18
VI	Conclusioni e sviluppi futuri	24
VII	Valutazione critica dell'iniziativa	24
VIII	Ringraziamenti	25
IX	Bibliografia	25

I. Introduzione

L'inquinamento marino da idrocarburi connesso allo sversamento in mare di petrolio greggio o dei prodotti della sua raffinazione (*oil spill*), rappresenta un serio problema ambientale che minaccia i fragili ecosistemi marini e costieri. Negli ultimi anni, la crescente richiesta di risorse petrolifere dovuta al repentino sviluppo industriale dei paesi del sud-est asiatico ha incrementato significativamente lo sfruttamento delle risorse petrolifere marine attraverso l'estrazione da piattaforme *off-shore* e il trasporto marittimo delle stesse attraverso navi cisterna o oleodotti sottomarini con conseguente aumento del rischio ambientale connesso a tali attività (Steven, 2015). Differenti sono le forme attraverso cui si può attuare l'inquinamento marino da *oil spill* (Figura 1).

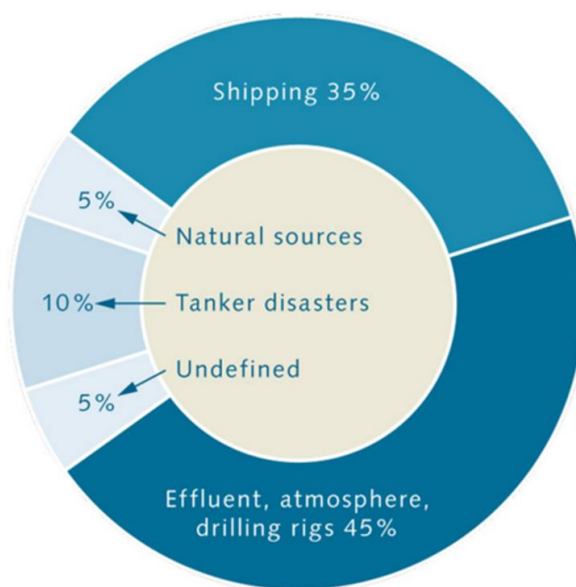


Figura 1. Principali fonti di sversamenti di idrocarburi in mare (adattato da Maribus, 2010).

Una parte importante è costituita dall'assorbimento dei componenti volatili del petrolio che sono emessi in atmosfera durante i vari tipi di processi di combustione cui sono sottoposti. Tale fonte, insieme agli apporti degli scarichi urbani e industriali e delle piattaforme di estrazione *on-shore*, rappresenta circa il 45% del contributo totale, difficilmente stimabile. Una fonte altrettanto importante, circa il 35%, deriva dal traffico delle navi cisterna e petroliere e delle relative operazioni di trasporto, compresi gli scarichi illegali e la pulizia dei serbatoi che riversa annualmente in mare un quantitativo enorme di inquinante in maniera distribuita ed incontrollata. Contributi minori, nell'ordine del 5% ciascuno, provengono sia da sorgenti naturali (*natural seeps*) sia da fonti incerte, mentre, i grandi incidenti petroliferi (collisione ed affondamento di petroliere, esplosioni o rotture di pozzi di estrazione in mare aperto, rottura accidentale di oleodotti, atti di guerra, ecc...) anche se contribuiscono in percentuale minore a questa classifica (circa il 10%), risultano essere i più

catastrofici dal punto di vista ambientale in quanto concentrano la fonte di inquinamento in un'area delimitata ([Maribus, 2010](#)).

L'incidente occorso nella primavera del 2010 alla piattaforma *Deep Water Horizon* nel golfo del Messico ha confermato, da un lato, i rischi cui le risorse marine sono esposte, dall'altro ha evidenziato la necessità di avere informazioni accurate e tempestive circa l'evento in atto per poter adottare delle contromisure efficaci ed efficienti. La tempestività nel riconoscimento degli incidenti è infatti di fondamentale importanza per attuare in tempi rapidi le azioni volte a limitarne il danno ambientale ed ad evitare che essi vadano ad interessare aree di particolare pregio naturalistico o turistico. Un sistema di monitoraggio che si ponga come obiettivo il riconoscimento tempestivo e la sorveglianza di questi fenomeni deve essere quindi in grado di osservare con frequenza ed in *real time* le aree in gioco in modo da poter fornire sia un primo allarme, sia la possibilità di seguirne con continuità le dinamiche spazio-temporali. In questo contesto, i sistemi di telerilevamento da satellite possono rappresentare almeno un utile complemento alle metodiche tradizionali di osservazione ([Copernicus, 2013](#)).

Attualmente i sistemi satellitari più utilizzati per il monitoraggio dell'inquinamento marino da idrocarburi sono i SAR (Radar ad Apertura Sintetica), sensori attivi nelle microonde cui è principalmente riconosciuta la capacità di identificare sversamenti di petrolio a mare con sufficiente grado di affidabilità ed elevata risoluzione spaziale (dalle decine di metri fino ad 1 metro). Sfortunatamente, accanto ad un tasso non trascurabile di falsi allarmi (legato principalmente alle condizioni variabili del vento, all'affioramento di alghe oleose, etc.), ai costi ancora relativamente elevati delle immagini e/o alla loro non immediata disponibilità, i limiti maggiori nell'utilizzo di tali sistemi, in un'ottica di monitoraggio operativo in *real time* degli *oil spill*, risiedono nella bassa ripetizione temporale (da alcuni giorni alle decine di giorni alle nostre latitudini) delle osservazioni SAR attualmente disponibili ([Fingas and Brown, 2015](#)). Anche la piena attuazione della missione satellitare COSMO-SkyMed (missione italiana con finalità sia militari che civili), con 4 satelliti SAR in costellazione, comunque non è riuscita garantire frequenze di osservazione più adatte ad un'attività operativa di sorveglianza, in quanto alcuni impedimenti relativi alla finalità militare e alle politiche di distribuzione ed accesso al dato, ne riducono di fatto il reale utilizzo su tempi e/o aree limitate ([Nirchio et al., 2009](#)). Probabilmente questo limite sarà superato a breve, quando sarà pienamente

operativa la missione ESA-Sentinel 1, realizzata nell'ambito del programma Copernicus ([Copernicus, 2013](#)).

In questo contesto, strumenti passivi in banda ottica (visibile e infrarosso) a bordo di satelliti meteorologici, possono risultare una valida alternativa o almeno un complemento alle tecniche SAR ([Leifeira et al, 2012](#)). Essi, infatti, sebbene abbiano risoluzioni spaziali più basse (da 250 metri a 3 chilometri) rispetto ai SAR, possiedono risoluzioni temporali (da 6 ore dei satelliti polari ai 15 minuti dei geostazionari) e continuità di copertura più idonee ad un monitoraggio in *real time* delle aree a rischio di inquinamento da idrocarburi. Ovviamente, tali dati devono essere processati utilizzando metodologie automatiche di analisi che garantiscano sia tempi di risposta adeguati alle frequenze di osservazione che soprattutto risultati affidabili indipendentemente dalle aree e dai sensori considerati ([Grimaldi et al, 2011a](#)).

Tra le tecniche basate su dati acquisiti in banda ottica per l'identificazione e il monitoraggio di *oil spill*, in questo programma di mobilità ci si è riferiti in particolare alle metodologie sviluppate rispettivamente presso il CNR-IMAA ([Casciello et al., 2007a](#)) e il MIST ([Zao et al, 2014](#)), entrambe ampiamente descritte di seguito. Uno dei principali obiettivi della visita è stato proprio il trasferimento e lo scambio di conoscenze su queste due metodologie, per poi poter, in un'ottica futura, effettuare una verifica delle loro potenzialità nonché del valore aggiunto derivante dalla loro integrazione per lo studio di uno o più eventi, preventivamente selezionati, relativi all'area del Golfo Persico e del Golfo di Oman.

II. Le Metodologie

Prima di entrare nello specifico di ciascuna delle due metodologie, va ricordato che il segnale alla base dell'individuazione degli *oil spill* si differenzia ovviamente in relazione al *range* spettrale considerato. Alle lunghezze d'onda del visibile-vicino infrarosso (VIS-NIR), l'aggiunta di idrocarburi sulla superficie del mare ne determina una variazione in termini di riflettanza (ρ), che, a seconda della geometria di osservazione, del moto ondoso e delle caratteristiche chimico-fisiche dell'olio (composizione, densità, grado di emulsione in acqua, spessore), può essere maggiore (contrasto positivo) o minore (contrasto negativo) rispetto alle acque circostanti ([Fingas & Brown, 2015](#)). Riguardo alla possibilità di utilizzo nelle bande dell'infrarosso termico (TIR), in letteratura esistono pochi studi nei quali il petrolio è stato caratterizzato spettralmente in questa regione e da tali lavori ([Hus, 1991; Salisbury et al., 1993](#)) si evince che il petrolio non presenta a queste lunghezze d'onda una particolare e significativa firma spettrale. Per questo motivo ci cercano di sfruttare

maggiormente gli effetti di contrasto con gli elementi circostanti dovuti ad altri fenomeni fisici. Infatti la possibilità di osservare la presenza di olio a mare nelle bande del TIR si deve essenzialmente alla minore inerzia termica dell'olio rispetto al mare. Questa caratteristica fa sì che di giorno l'olio tenda a riscaldarsi molto più velocemente dell'acqua, assumendo quindi nelle acquisizioni diurne nel TIR una Temperatura di Brillanza (TB) maggiore, mentre il contrario avviene nelle acquisizioni notturne ([Cross, 1992](#)).

II.a La tecnica “RST-OIL”

La metodologia per l'individuazione e il monitoraggio degli oil spill sviluppata presso i laboratori del CNR-IMAA risulta essere un'applicazione specifica di una metodologia più generale, definita *Robust Satellite Techniques* (RST – [Tramutoli 2005, 2007](#)). RST è un approccio generale di analisi multi-temporale di dati satellitari che prevede la caratterizzazione del segnale misurato tramite l'analisi di serie storiche di dati satellitari omogenei nel dominio spazio-temporale per il riconoscimento del valore atteso del segnale in specifiche condizioni di osservazione nonché della intrinseca variabilità naturale per tali condizioni di osservazione. Successivamente, eventuali anomalie del segnale vengono riconosciute come scostamenti statisticamente significativi da tali valori attesi, implementando il seguente *Absolutely Local Index of Change of Environment* (ALICE):

$$\otimes_v(x, y, t) = \frac{V(x, y, t) - V_{ref}(x, y)}{\sigma_{V_{ref}}(x, y)} \quad (II.1)$$

dove $V(x,y,t)$ è il segnale misurato nel *pixel* considerato dell'immagine analizzata (relativa al tempo t di acquisizione), $V_{ref}(x,y)$ rappresenta il valore atteso in condizioni imperturbate, di solito espresso tramite la media temporale ($\mu_v(x,y)$), e $\sigma_{V_{ref}}(x,y)$ la deviazione standard calcolati per il *pixel* (x,y) su tutto il data set storico conforme alle caratteristiche dell'immagine investigata. L'indice proposto consente di misurare l'anomalia locale del valore $V(x,y,t)$ per raffronto con il suo valore atteso $V_{ref}(x,y)$ pesandone la differenza con la normale variabilità $\sigma_{V_{ref}}(x,y)$ del segnale in quel punto. In questo senso la metodologia RST è robusta, giacché una anomalia sarà considerata tale soltanto nel caso in cui la deviazione tra il segnale misurato, e quello di riferimento ($V_{ref}(x,y)$), che definisce lo stato imperturbato, è significativamente maggiore della variabilità storica del segnale misurato ($\sigma_{V_{ref}}(x,y)$) nella quale sono comprese tutte le componenti, note e non note, che la hanno determinata nonché i contributi dovuti alle condizioni variabili di osservazione, e gli errori di processamento e co-localizzazione delle immagini utilizzate.

Due ulteriori precisazioni sono fondamentali ([Tramutoli, 1998](#)): i) il segnale $V(x,y,t)$ è la misura effettuata in un unico specifico canale spettrale, ma può anche essere una combinazione di diverse bande; ii) il segnale rappresentativo del valore atteso, che come detto di solito è rappresentato dalla media temporale ($\mu_V(x,y)$), può, per specifici segnali, essere descritto dal valore massimo ($V_{\max}(x,y)$) o minimo ($V_{\min}(x,y)$) storicamente osservati per ogni *pixel* (x,y) della scena.

La prima applicazione di RST per l'individuazione di *oil spill*, RST-OIL, ha riguardato l'utilizzo di dati acquisiti dal sensore *Advance Very High Resolution Radiometer* (AVHRR) nell'infrarosso termico, sfruttando le già citate caratteristiche in termini di inerzia termica degli oli ([Casciello et al., 2007a](#)).

L'equazione (II.1) è stata adattata conseguentemente:

$$\otimes_{TIR_x}(x, y, t) = \frac{[TIR_x(x, y, t) - \mu_{TIR_x}(x, y)]}{\sigma_{TIR_x}(x, y)} \quad (II.2)$$

dove il segnale investigato $V(x,y,t)$ nell'Eq. (II.1) è rappresentato da TIR_x , ovvero la Temperatura di Brillanza misurata in uno dei canali TIR di AVHRR (x = canale 4 a 10,3-11,3 μm o canale 5 a 11,5-12,5 μm), $\mu_{TIR_x}(x,y)$ e $\sigma_{TIR_x}(x,y)$ sono rispettivamente la media temporale la deviazione standard per il segnale considerato calcolati utilizzando serie storiche di dati AVHRR omogenei nel dominio spaziale, temporale e spettrale. Per quanto anticipato rispetto al contrasto in termini di inerzia tra l'olio e le acque circostanti, tale indicatore assumerà valori positivi e alti, da un punto di vista statistico, in presenza di idrocarburi in immagine diurne, e bassi e negativi in acquisizioni notturne.

A partire da questa prima applicazione, nel prosieguo il segnale $V(x,y,t)$ è stato sostituito da indicatori più evoluti, sempre basati sulle misure nel TIR, acquisite anche dal *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), in grado di: i) ridurre il rischio di falsi allarmi dovuti ad effetti di riscaldamento occasionale (ad esempio a causa di un anno particolarmente caldo o alla presenza di correnti marine superficiali); ii) di aumentare la sensibilità rispetto ad eventi di piccola intensità, sia in termini di dimensioni spaziale che di segnale emesso. In particolare, in un primo aggiornamento, esso è stato rimpiazzato dal segnale $\Delta T(x,y,t) = T(x,y,t) - \langle T(t) \rangle$, ovvero la differenza di temperatura di brillanza tra il valore $T(x,y,t)$ misurato nel *pixel* (x,y) nella banda TIR di AVHRR o MODIS considerata, e la media spaziale $\langle T(t) \rangle$, calcolata su tutti i *pixel* di mare non nuvolosi all'interno dell'area di indagine. Tale indicatore, definito *Robust Estimator of TIR Anomalies* (RETIRA), permette appunto di meglio enfatizzare i contrasti termici dovuti ad una reale presenza di spill rispetto ad improvvisi aumenti di temperatura che possono interessare tutta la superficie marina. L'evoluzione ulteriore verso un aumento di sensibilità ad eventi di intensità piccola è stato ottenuto implementando il $RETIRA_{\text{box}}$, dove il segnale $\Delta T(x,y,t) = T(x,y,t) - \langle T(t) \rangle$ è calcolato come differenza

tra la temperatura di brillantezza tra il valore $T(x,y,t)$ misurato nel pixel (x,y) nella banda TIR considerata, e la media spaziale $\langle T(t,N) \rangle$ calcolata nei $N \times N - 1$ pixels contenuti nel box $N \times N$ di cui (x,y) è il centro e considerando solo i punti di mare non nuvolosi. L'incremento di sensibilità attuatosi nell'evoluzione di RST-OIL dall'approccio classico basato sul segnale TIR a quello ultimo basato sul ΔT_{box} è ben evidente in Figura 2, dove sono mostrati i relativi risultati ottenuti dai vari indicatori utilizzando dati acquisiti nel canale 4 di AVHRR nell'analisi dell'evento che ha interessato il Golfo del Persico il 24 gennaio 1991 alle 10.31 GMT (13.31 LT).

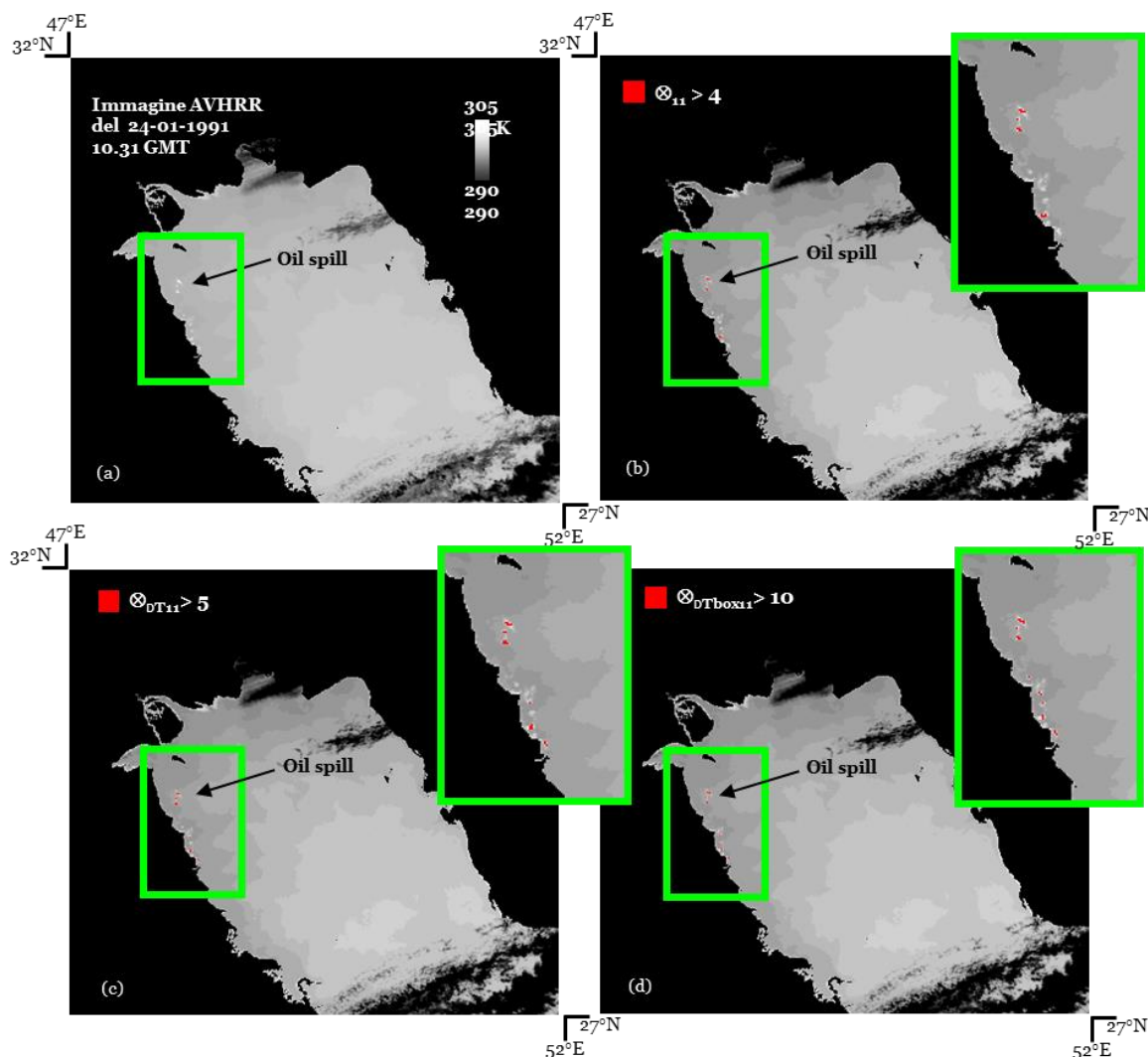


Figura 2. In (a) immagine AVHRR del 24 gennaio 1991 alle 10.31 GMT (13.31 LT) nel canale 4 relativa allo sversamento della guerra del Golfo Persico; in (b) applicazione RST-OIL con indice ALICE; in (c) applicazione RST-OIL con indice RETIRA; in (d) applicazione RST-OIL con indice RETIRA_{box}. In rosso sono riportati i pixel identificati come affetti dalla presenza di olio mentre la terra è mascherata in nero.

A parità di affidabilità, si ha un notevole incremento di sensibilità passando da RST-OIL implementata con indice ALICE (Eq. II.1) a quella implementata con indice RETIRA, con un aumento significativo dei pixel rilevati nonché del rapporto Segnale/Rumore (S/N), come evidente in Tabella II.1. RETIRA

infatti permette di abbattere problemi dovuti ad effetti di riscaldamento occasionale (ad esempio a causa di un anno particolarmente caldo o alla presenza di correnti marine superficiali) che possono ridurre invece la sensibilità dell'indice ALICE. L'implementazione di RST-OIL con indice RETIRA_{box}, migliora ulteriormente, a parità di affidabilità, le caratteristiche di sensibilità della tecnica rispetto alle configurazioni precedenti, con nuovo aumento dei pixel rilevati nonché del rapporto S/N. Si passa da 21 pixel anomali rilevati da RETIRA ai 34 pixel di RETIRA_{box} con livelli di rapporto Segnale/Rumore con la quale viene fatta la rilevazione "con certezza", ovvero senza falsi allarmi sulla scena, che passa da 5 a 10. Il valore massimo di S/N di anomalie rilevate su tutta la scena sale invece da 11.13 a 33.02. Nella tabella II.1 sono riportati in sintesi i risultati ottenuti applicando i tre diversi indici ([Grimaldi et al., 2011a](#)).

	ALICE - \otimes TIR	RETIRA - \otimes Δ T	RETIRA _{box} - \otimes Δ T _{box}
	24 gennaio 1991		
Valore di S/N per la detection	4	5	10
Numero di pixel di oil spill rilevati	15	21	34
Massimo valore di S/N	7.87	11.13	33.02

Tabella II.1. Confronto risultati RST-OIL ALICE, RETIRA e RETIRA_{box} per uno dei giorni dell'evento della guerra del Golfo Persico.

L'approccio RST è stato applicato anche ai dati misurati nel dominio VIS-NIR, sostituendo al segnale $V(x,y,t)$ nell'Eq. (II.1), il valore della riflettanza (ρ) misurata nelle relative bande da AVHRR e MODIS. In questo caso, valori alti e positivi dell'indicatore sono da attendersi in caso di presenza di olio con un contrasto positivo, il contrario in caso di contrasto negativo.

Un esempio di utilizzo dei canali del visibile è mostrato in Figura 3, relativo ad uno sversamento illegale a largo delle coste di Montalto di Castro, nel Lazio, il 26 giugno 2005, scoperto da un anonimo internauta, mentre consultava Google Earth. Per il giorno dell'evento erano disponibili due immagini MODIS prive di nuvole, una acquisita alle 11.00 GMT (13.00 LT) dal satellite Terra ed una alle 12.40 GMT (14.40 LT) dal satellite Aqua.

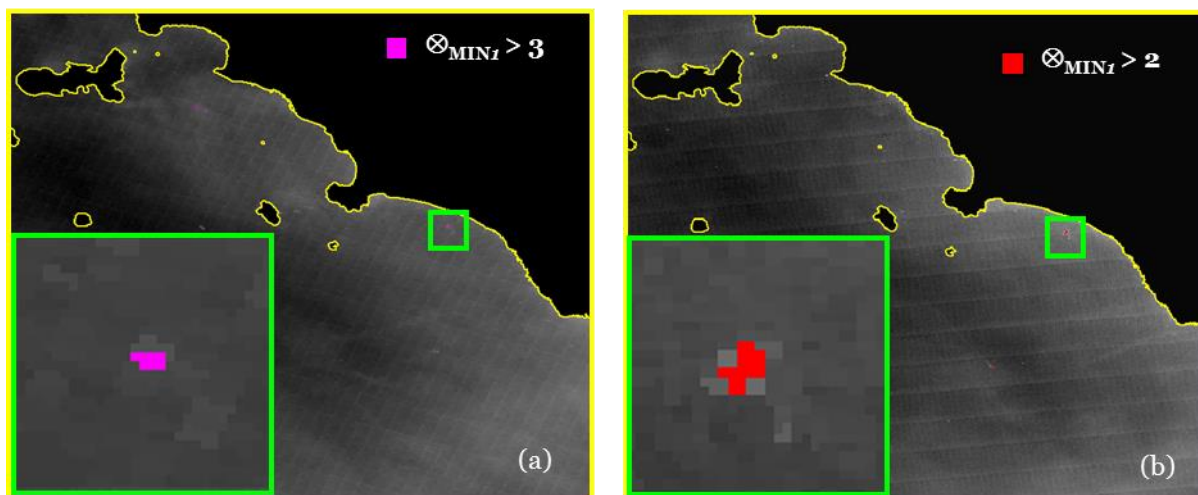


Figura 3. Risultati ottenuti applicando l'approccio RST alle riflettanze acquisite nel canale 1 di MODIS per le immagini del (a) del 26 giugno 2005 alle ore 11.00 GMT (13.00 LT); (b) dello stesso giorno alle 12.40 GMT (14.40 LT). La terra è mascherata in nero.

In particolare, in questo caso, nell'ottica di enfatizzare quanto più possibile il relativo basso contrasto positivo dell'olio, le condizioni imperturbate (V_{ref} in eq (II.1)) sono state identificate dal segnale $\rho_{min}(x,y)$, ovvero dalla riflettanza minima storicamente osservata per ogni pixel della scena. La presenza dell'olio in corrispondenza della macchia rilevata su Google Earth nelle due immagini acquisite ad un intervallo di circa 3 ore è ben evidente ([Grimaldi et al 2009c](#)). Questo risultato acquista un significato maggiore se consideriamo che il caso studio può essere classificato come un evento "piccolo" (pochi chilometri quadrati di estensione e/o scarsa intensità di segnale). Inoltre è possibile osservare la diminuzione dell'intensità relativa delle anomalie riscontrate passando dalla prima alla seconda acquisizione. Precisamente, in quella delle ore 11:00 GMT si rilevano 7 pixel anomali dovuti allo sversamento con un valore medio di S/N intorno 3.16, mentre, alle 12:40 GMT si rilevano 17 pixel anomali dovuti al petrolio con un valore medio che scende a 2.247. Questo risultato è facilmente spiegabile con gli effetti di *weathering* che sono intercorsi tra le due acquisizioni MODIS con conseguente dispersione del petrolio (allargamento della chiazza dalle ore 11.00 alle ore 12.40 GMT) ed attenuazione del segnale.

L'approccio RST-OIL, nelle sue varie versioni, è stato applicato con successo per l'individuazione e il monitoraggio di diversi eventi di oil spill accaduti in diverse aree del mondo. La tabella II.2 riporta il sommario delle sue applicazioni, fornendo ulteriori dettagli: il tipo di segnale considerato, il sensore, la fascia oraria di applicazione e le relative referenze.

Signal (V)	Sensor/data	Daytime/Night-time/Both	Reference
ALICE (TB)	AVHRR/CH4; CH5	Daytime	Casciello, 2007a
RETIRA (TB)	AVHRR/CH4; CH5	Daytime	Casciello et al., 2007a, 2007b, 2011 Grimaldi et al., 2011b
RETIRA (TB)	MODIS/CH31; CH32	Daytime	Grimaldi et al., 2009a; Grimaldi et al., 2011a; b
RETIRA _{box} (TB)	MODIS/CH31; CH32	Daytime	Grimaldi et al., 2011a
RETIRA (TB SplitWindow)	MODIS/CH31; CH32	Both	Grimaldi et al., 2011c
VIS (ρ)	MODIS/CH1;CH2	Daytime	Grimaldi et al., 2009b; Grimaldi et al., 2009c

Tabella II.2. Evoluzione nel tempo dell'approccio RST-OIL.

I risultati conseguiti hanno chiaramente mostrato le capacità di RST-OIL di essere un valido strumento di identificazione e monitoraggio continuo della presenza di idrocarburi in mare. I limiti principali di applicazione della tecnica sono principalmente l'assenza di un dataset storico sufficientemente lungo (almeno 5 anni di dati) per permettere una robusta caratterizzazione del segnale indagato, e la bassa sensibilità rispetto ad eventi di piccole dimensioni, che non permettano una perturbazione sufficientemente osservabile alla scala del pixel. A questi limiti, propri della natura di RST, va ovviamente poi aggiunta l'inefficacia in caso di presenza di copertura nuvolosa. Nel caso in cui le condizioni precedenti non si verificano, RST-OIL può essere facilmente implementata per operare in *near real time*, fornendo, in maniera automatica e non super-visionata, l'eventuale indicazione della presenza di sversamenti di idrocarburi entro pochi minuti dal termine dell'acquisizione di un passaggio satellitare.

II.b La tecnica "MIST"

La metodologia sviluppata presso i laboratori del MIST si basa sull'analisi di singole immagini, visualizzate in RGB *true color*, nelle quali l'olio viene individuato attraverso una analisi visiva. L'applicazione di indici specifici per il riconoscimento di eventuali eccessi algali (*algal bloom*), che mostrano comportamenti spettrali tipo gli oli, permette poi un abbattimento dei falsi allarmi ([Zhao et al., 2014; 2015](#)).

Dati acquisiti alle lunghezze d'onda del visibile, da: i) ETM+ e OLI, a 30m di risoluzione spaziale, ii) MODIS a 250 m di risoluzione spaziale, iii) MERIS a 300 m di risoluzione spaziale e iv) VIIRS a 350 m di risoluzione spaziale sono stati utilizzati per testare questa metodologia. A partire dai dati calibrati

in radianza, tramite il software *SeaDas* vengono generate le immagini *Rayleigh-corrected reflectance* (Rrc). Si tratta di dati cui è stata applicata la correzione atmosferica per correggere dell'effetto di *Rayleigh*, che è predominante alle lunghezze d'onda del visibile. In questo modo, le variazioni di riflettanza misurate sulle immagini sono più prettamente legate ai differenti elementi presenti sulla superficie del mare.

Questi dati Rrc vengono opportunamente combinati, a seconda dei sensori, per realizzare delle immagini RGB *true color* nelle quali ricercare il differente comportamento spettrale (i.e., contrasto negativo o positivo) dell'olio rispetto alle acque circostanti. In particolare, le combinazioni utilizzate per i vari sensori, sono riportate in tabella II.3.

Sensor	Red Band Rrc (nm)	Green Band Rrc (nm)	Blue Band Rrc (nm)
MODIS	645	555	469
MERIS	665	560	443
ETM+ (Landsat 7)	660	565	483
OLI (Landsat 8)	665	562	443
VIIRS	671	551	486

Tabella II.3. Bande Rrc utilizzate per ciascun sensore per generare le relative immagini RGB *true color*.

Le differenze tra i vari sensori dipende dalle relative posizioni del centro della banda considerato in ognuno di essi. Come anticipato, per ognuno dei dati considerato, al fianco di queste mappe RGB, vengono generate delle mappe di *Floating Algae Index* (FAI – [Hu, 2009](#)), per aumentare la robustezza rispetto a segnali dalle caratteristiche spettrali simili a quelle dell'olio.

Il Fai è definito come:

$$FAI = Rrc_{(NIR)} - Rrc'_{(NIR)} \quad \text{II.3}$$

dove $Rrc_{(NIR)}$ è la riflettanza del mare nel NIR e $Rrc'_{(NIR)}$ è quella di riferimento nel NIR derivata da un'interpolazione lineare tra le riflettanze nel RED ($Rrc_{(RED)}$) e nello SWIR ($Rrc_{(SWIR)}$), come di seguito mostrato:

$$Rrc'_{(NIR)} = Rrc_{(RED)} + (Rrc_{(SWIR)} - Rrc_{(RED)}) \times \frac{(\lambda_{NIR} - \lambda_{RED})}{(\lambda_{SWIR} - \lambda_{RED})} \quad \text{II.4}$$

con λ_{RED} , λ_{NIR} , λ_{SWIR} , pari alle lunghezze d'onda dei corrispondenti canali per ciascun sensore. Valori di FAI ≥ 0.2 corrispondono al 100% di copertura algale, mentre valori ≈ 0 rappresentano la loro

assenza e valori negativi sono presenti in corrispondenza di oil spill. In tabella II.4 sono indicate le bande utilizzate per ciascun sensore nel calcolo del FAI. Si noti che esso non può essere calcolato per il sensore MERIS che non dispone di bande nello SWIR.

Sensor	Red Band Rrc (nm)	NIR Band Rrc (nm)	SWIR Band Rrc (nm)
MODIS	645	859	1240
ETM+ (Landsat 7)	660	825	1650
OLI (Landsat 8)	665	865	1610
VIIRS	671	865	1240

Tabella II.4. Bande Rrc utilizzate per ciascun sensore per generare le relative immagini FAI.

Un esempio di applicazione della metodologia è mostrato in Figura 4 ([Zao et al., 2014](#)). Sia MERIS (Fig. 4a) che MODIS (Fig. 4b) evidenziano la presenza nell'area di zone a contrasto negativo, racchiuse nelle polilinee rosse, che potrebbero essere associabili alla presenza di olio. Per tutti i *pixel* lungo il transetto verde evidenziato in Fig. 4b, le relative firme spettrali in termini di R_{rc} sono plottate in Figura 4c, differenziandole tra quelle probabilmente affette da olio o meno. Due picchi sono ben evidenti a 469 e a 488 nm. La minore riflettanza delle zone affette da olio è ben evidente sia in Figura 4c che in Figura 4d dove è plottato il profilo spaziale lungo il transetto già menzionato per le prime 7 bande di MODIS. Si noti come il contrasto tra le riflettanze misurate in corrispondenza dell'olio e le aree libere da esse cresca all'aumentare della lunghezza d'onda. La variabilità misurata in presenza degli spill è dovuta alla differente frazione di olio distribuito lungo il transetto. A conferma dell'affidabilità della identificazione, in Figura 5 è mostrata la mappa FAI costruita per la stessa immagine MODIS, in cui è confermata sia l'assenza di *algal bloom* sia l'occorrenza di valori negativi nelle aree individuate come interessate dagli *spill*.

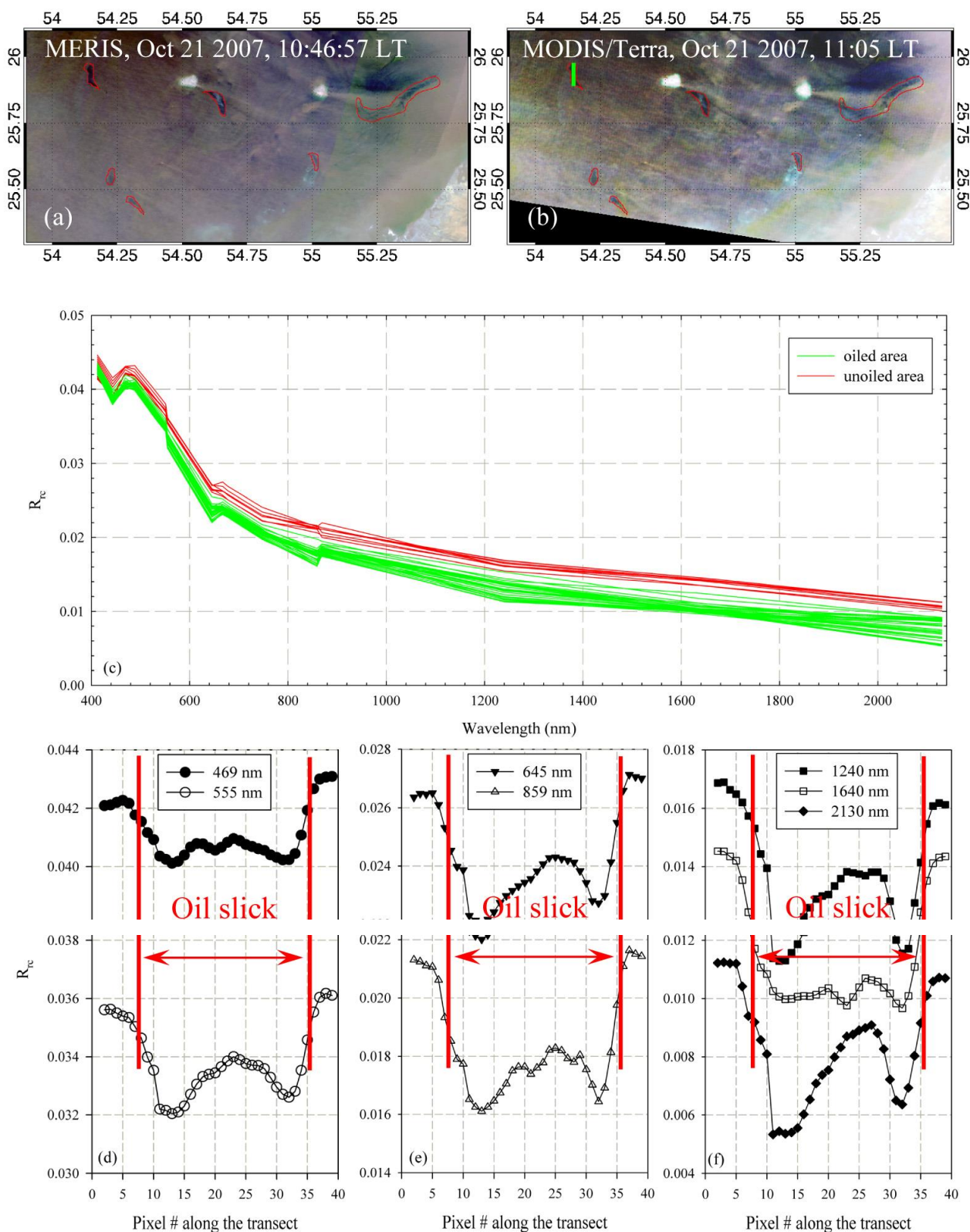


Figura 4. In (a) immagine MERIS del 21 Ottobre 2007 (10:46 LT) rappresentata in RGB true color; (b) immagine MODIS/Terra RGB del 21 Ottobre 2007 (11:05 LT) anch'essa codificata in RGB true color; (c) per ciascuno dei 40 pixel componenti il transetto verde in (b), le relative firme spettrali da 412 a 2130 nm; d), e), and f) mostrano le R_{rc} MODIS per le prime 7 bande MODIS lungo lo stesso transetto.

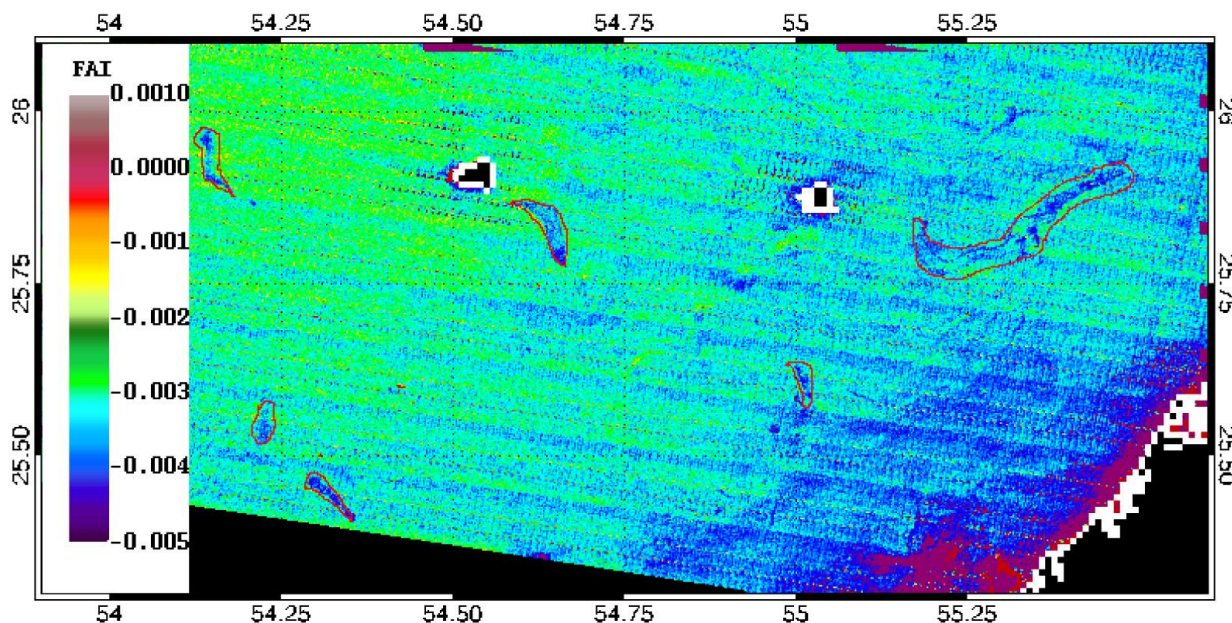


Figura 5. Immagine FAI ottenuta a partire dallo stesso dato MODIS/Terra di figura 4b. Gli *oil spill* sono racchiusi nelle polilinee rosse.

I risultati appena mostrati hanno evidenziato le potenzialità anche dell'approccio sviluppato presso i laboratori del MIST nell'individuare la presenza di *spill* utilizzando dati acquisiti alle lunghezze d'onda del VIS-NIR. La metodologia, come detto, può essere implementata anche sui dati Landsat, fornendo pertanto un sicuro valore aggiunto in termini di risoluzione spaziale e quindi di riconoscimento di eventi di piccole dimensioni. Inoltre, in presenza di un evento accertato, essa può essere applicata in tempi relativamente brevi e senza particolari complessità di elaborazione. D'altro canto, la tecnica non risulta ancora pronta per essere implementata in maniera automatica e indipendentemente dalla presenza o meno di eventi.

Risulta pertanto chiaro come l'integrazione delle due metodologie (i.e., RST-OIL e MIST) possa effettivamente rappresentare un valore aggiunto, sfruttando i vantaggi propri di ognuna delle tecniche che permetta di ottenere risultati più accurati.

III. L'area di studio

Il Golfo Persico, o *Arabian Gulf*, è un golfo dell'oceano Indiano, collegato al mare di Oman tramite lo stretto di Hormu, che bagna le coste di Oman, Emirati Arabi Uniti, Arabia Saudita, Qatar, Bahrain, Kuwait, Iraq e Iran (Figura 6). Nel 1978, le otto nazioni formalizzarono la nascita della *Regional Organization for the Protection of the Marine Environment* (ROPME, <http://ropme.org/Home.clx>) con lo scopo di preservare lo stato e la qualità delle acque del Golfo Persico. La caratteristica principale del Golfo, come accertato dalla *Organization of the Petroleum Exporting Countries* (OPEC) è che essa

possiede la più alta riserva di olio greggio al mondo ([OPEC, 2014](#)). Un'altra peculiarità importante dell'area è l'intenso traffico marittimo, con una stima annuale di circa 50.000 tipi di imbarcazioni, tra cui moltissime petroliere.

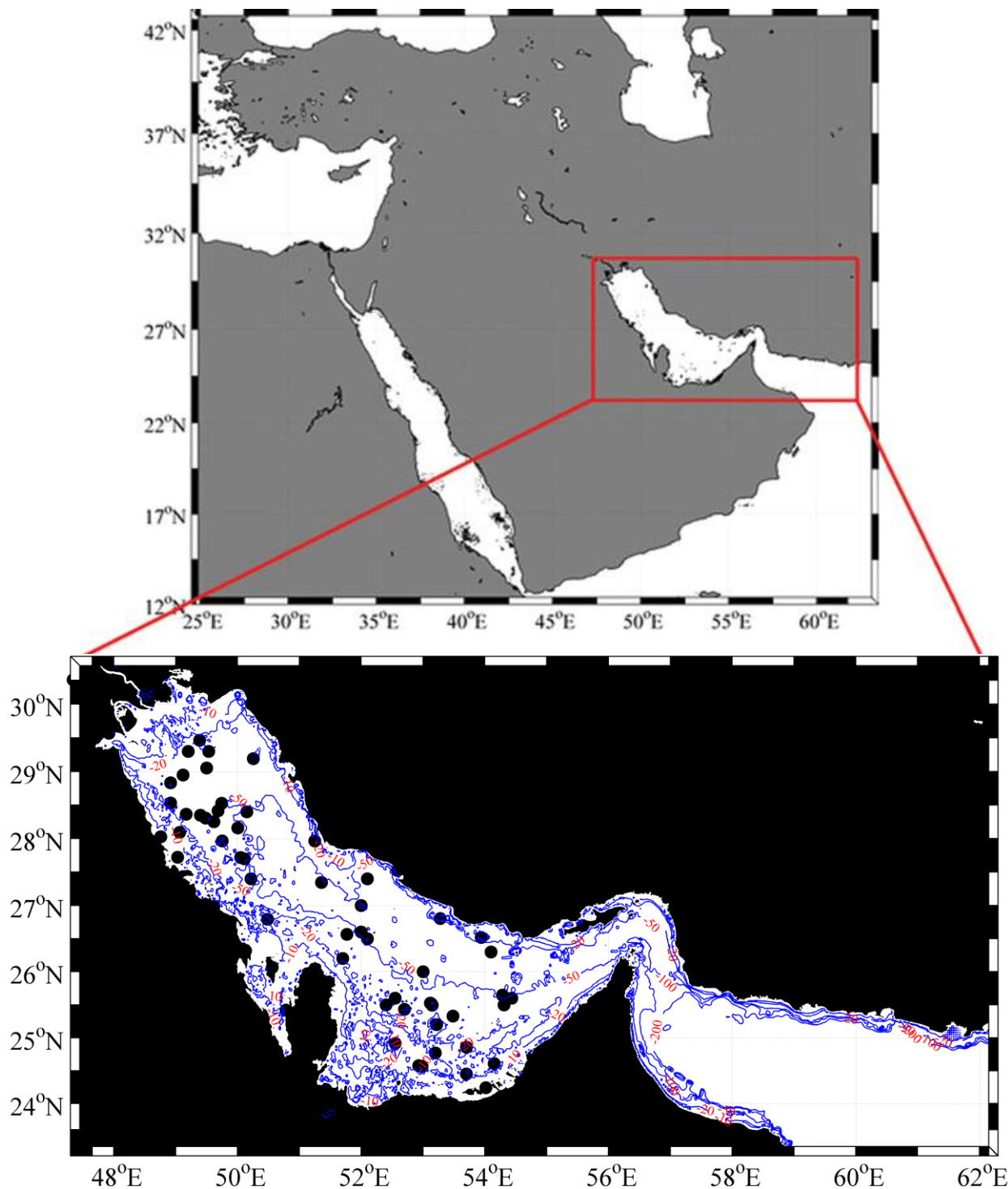


Figura 6. L'area del Golfo Persico. Le linee blu indicano le isobate a 10, 20, 50, 100, 200 m. I cerchi neri evidenziano i principali campi di estrazione di petrolio presenti nell'area.

E' chiaro, pertanto, che i problemi connessi sia all'estrazione del petrolio sia al traffico navale, sommati ad altre fonti quali dragaggio, infiltrazioni naturali, e lo scarico delle acque di zavorra, possano aver causato episodi frequenti di inquinamento marino da idrocarburi nella regione.

La Figura 7 mostra il numero di eventi di *oil spill* che hanno interessato il Golfo Persico dal 1965 al 2012, e il relativo volume di idrocarburi rilasciati in mare (*Marine Emergency Mutual Aid Center - MEMAC*, <http://www.memac-rsa.org/>). Gli eventi più importanti sono accaduti durante le guerre del Golfo, negli anni 80 e 90. Nel 2009 sono stati documentati 52 eventi. Un totale di circa 5.65×10^8 galloni di olio è stato riversato nel Golfo Persico nei 48 anni di rilevamento.

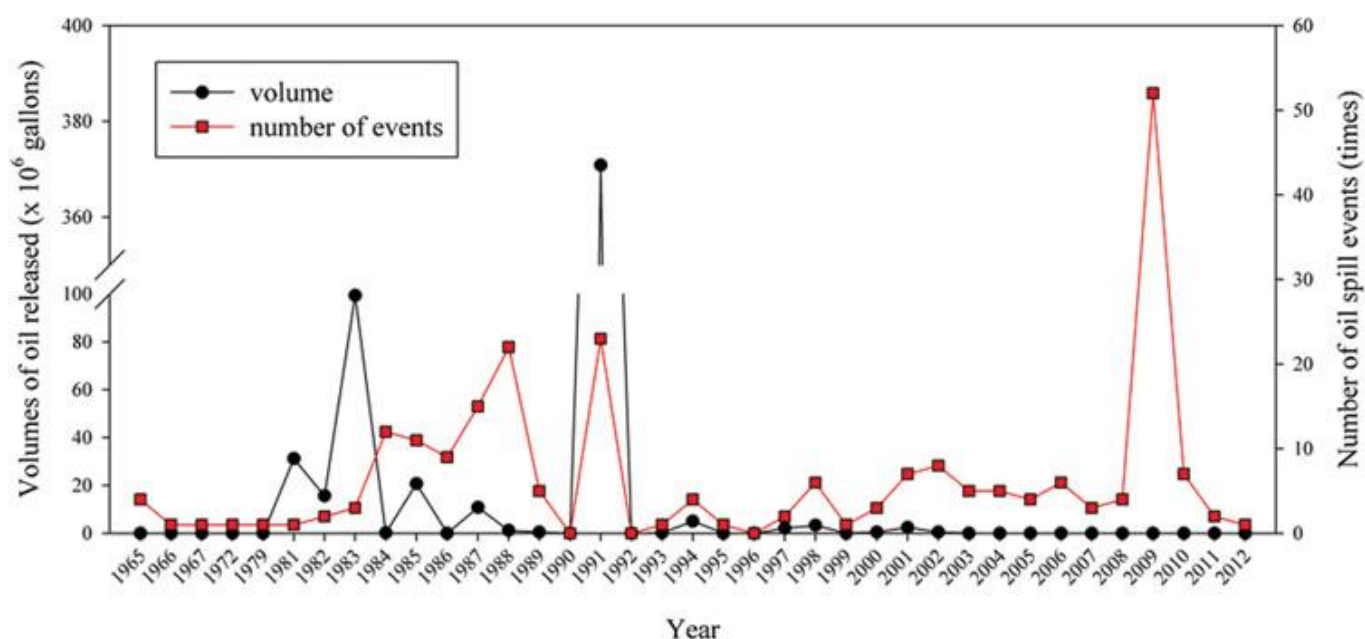


Figura 7. Volume di olio rilasciato nel Golfo Persico e numero di eventi di oil spill registrati nel periodo 1965 - 2012 ([Marine Emergency Mutual Aid Center - MEMAC](http://www.memac-rsa.org/)).

Questi numeri ben evidenziano la necessità di sviluppare sistemi adeguati di monitoraggio dell'area del golfo Persico, abili nel riconoscere tempestivamente e con affidabilità la presenza di eventuali oil spill.

IV. Il caso di studio

Tra i numerosi eventi che hanno interessato l'area, il caso dell'affondamento della petroliera Zainab, avvenuto nell'aprile 2001 al largo delle coste di Dubai negli Emirati Arabi (Figura 8), è stato selezionato come caso studio. La petroliera Zainab fu sorpresa a contrabbandare 1.300 ton di petrolio irakeno e per questo fermata dal *Multinational Interception Force* il 13 aprile 2001. Il successivo affondamento è avvenuto "misteriosamente" (probabilmente ad opera degli stessi contrabbandieri

per liberarsi delle prove) il 14 aprile 2001 a partire dal primo pomeriggio mentre veniva scortata verso una nazione ospite. Il rilascio del suo contenuto in mare, circa 300-400 ton di petrolio greggio, è avvenuto gradualmente formando una chiazza di circa 12 km di diametro che ha minacciato sia l'oasi naturale dell'isola di Sir Bou Neair, sia l'impianto di desalinizzazione Jebel Ali in Dubai (Chu et al., 2008; McKenzie, 2003).

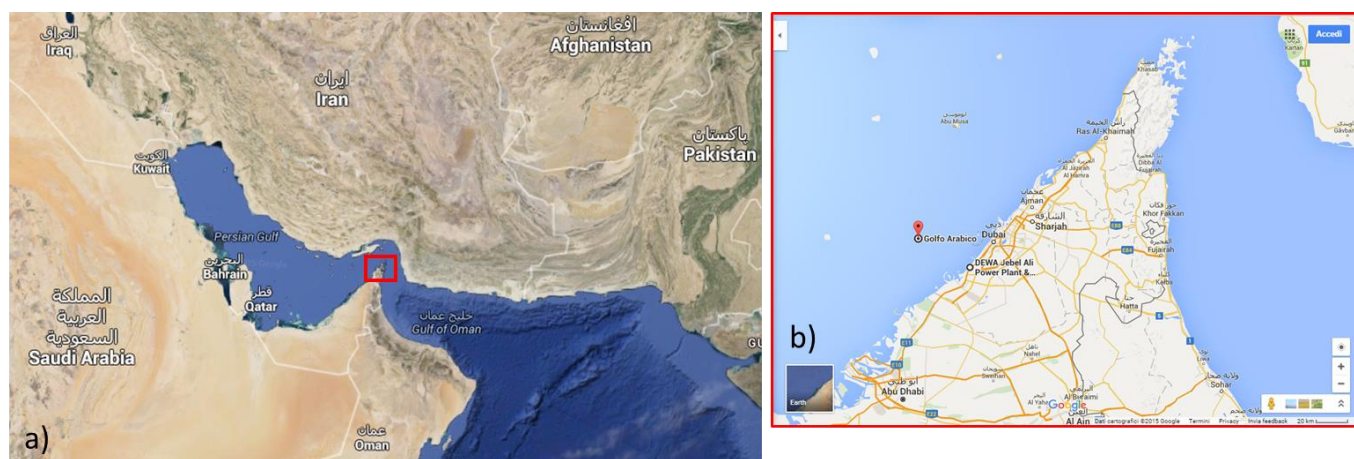


Figura 8. Localizzazione dell'area interessata dall'evento di studio: a) area del golfo Persico; b) ingrandimento della porzione nel riquadro rosso in a). Il segnaposto in rosso indica la posizione attuale del relitto della Zainab al largo delle coste di Dubai.

V. I risultati

I risultati mostrati di seguito non possono che essere preliminari, in quanto il tempo a disposizione non è stato ovviamente sufficiente per una completa analisi dell'evento tramite le due metodologie precedentemente descritte. Il lavoro effettuato è consistito per lo più in uno studio delle caratteristiche spettrali e di *features* spaziali dell'evento selezionato, per verificarne le potenzialità di investigazione attraverso le due tecniche.

In quest'ottica, una prima fase è consistita nella ricerca delle immagini MODIS utili ai fini dell'analisi dell'evento. Il portale di riferimento per tali immagini è quello LAADS web della NASA (<https://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/add.html>), dove sono archiviate tutte le orbite MODIS finora acquisite processate al Level 1B nella loro più recente versione (attualmente la 6.0). I dati vengono distribuiti in formato HDF in granuli pari a 5 minuti di acquisizione, per una dimensione della scena di circa 1354 km (*cross track*) per 2030 (*along track*). La tabella IV.1 mostra tutti i passaggi Terra disponibili per il mese di Aprile 2001 a 250 mt di risoluzione spaziale. Complessivamente questi dati sommano a circa 9GB di dati, di cui circa 2 GB relativi al periodo dal 13 al 20 Aprile 2011, sui quali ci si è concentrati.

Date	Hour	File	Size (MB)
01/04/2001	06:40	MOD02QKM	155
01/04/2001	08:20	MOD02QKM	157
02/04/2001	07:25	MOD02QKM	149
03/04/2001	06:25	MOD02QKM	162
03/04/2001	06:30	MOD02QKM	130
03/04/2001	08:05	MOD02QKM	165
03/04/2001	08:10	MOD02QKM	156
04/04/2001	07:10	MOD02QKM	154
04/04/2001	07:15	MOD02QKM	146
05/04/2001	07:55	MOD02QKM	159
06/04/2001	07:00	MOD02QKM	140
07/04/2001	07:40	MOD02QKM	167
07/04/2001	07:45	MOD02QKM	153
08/04/2001	06:45	MOD02QKM	157
08/04/2001	06:50	MOD02QKM	140
08/04/2001	08:25	MOD02QKM	158
09/04/2001	07:30	MOD02QKM	156
10/04/2001	06:35	MOD02QKM	146
10/04/2001	08:10	MOD02QKM	162
10/04/2001	08:15	MOD02QKM	156
11/04/2001	07:15	MOD02QKM	157
11/04/2001	07:20	MOD02QKM	149
12/04/2001	06:20	MOD02QKM	161
12/04/2001	06:25	MOD02QKM	143
12/04/2001	08:00	MOD02QKM	159
13/04/2001	07:05	MOD02QKM	154
14/04/2001	07:50	MOD02QKM	152
15/04/2001	06:50	MOD02QKM	161
15/04/2001	06:55	MOD02QKM	143

Date	Hour	File	Size (MB)
16/04/2001	07:35	MOD02QKM	156
17/04/2001	06:40	MOD02QKM	155
17/04/2001	08:20	MOD02QKM	155
18/04/2001	07:25	MOD02QKM	150
19/04/2001	06:25	MOD02QKM	164
19/04/2001	06:30	MOD02QKM	147
19/04/2001	08:05	MOD02QKM	160
19/04/2001	08:10	MOD02QKM	157
20/04/2001	07:10	MOD02QKM	155
20/04/2001	07:15	MOD02QKM	151
21/04/2001	07:55	MOD02QKM	160
22/04/2001	07:00	MOD02QKM	152
23/04/2001	07:40	MOD02QKM	161
23/04/2001	07:45	MOD02QKM	157
24/04/2001	06:45	MOD02QKM	158
24/04/2001	06:50	MOD02QKM	141
24/04/2001	08:25	MOD02QKM	159
25/04/2001	07:30	MOD02QKM	154
26/04/2001	06:35	MOD02QKM	142
26/04/2001	08:10	MOD02QKM	165
26/04/2001	08:15	MOD02QKM	158
27/04/2001	07:15	MOD02QKM	160
27/04/2001	07:20	MOD02QKM	146
28/04/2001	06:20	MOD02QKM	160
28/04/2001	06:25	MOD02QKM	139
28/04/2001	08:00	MOD02QKM	160
29/04/2001	07:05	MOD02QKM	156
30/04/2001	07:45	MOD02QKM	160
30/04/2001	07:50	MOD02QKM	154

Tabella IV.1. Dati MODIS-TERRA diurni, a 250 m di risoluzione spaziale, disponibili presso gli archivi del NASA LAADS web per il mese di Aprile 2001.

Da ognuna di queste orbite, dopo il relativo download e mosaicatura, è stata estratta una regione di interesse (ROI) di 300x400 pixel poi riproiettata nella stessa proiezione geografica (Lat/Long - WGS84) e centrata a 25.5 ° LAT N e 55 ° LONG E. Queste operazioni sono state effettuate utilizzando il software HDFLook, un applicativo sviluppato ad hoc per analizzare dati MODIS. La sequenza delle immagini dal 13 al 20 Aprile 2011, codificate in RGB true color e generate da tale software senza apportare alcuna correzione atmosferica, è mostrata in Figura 9.

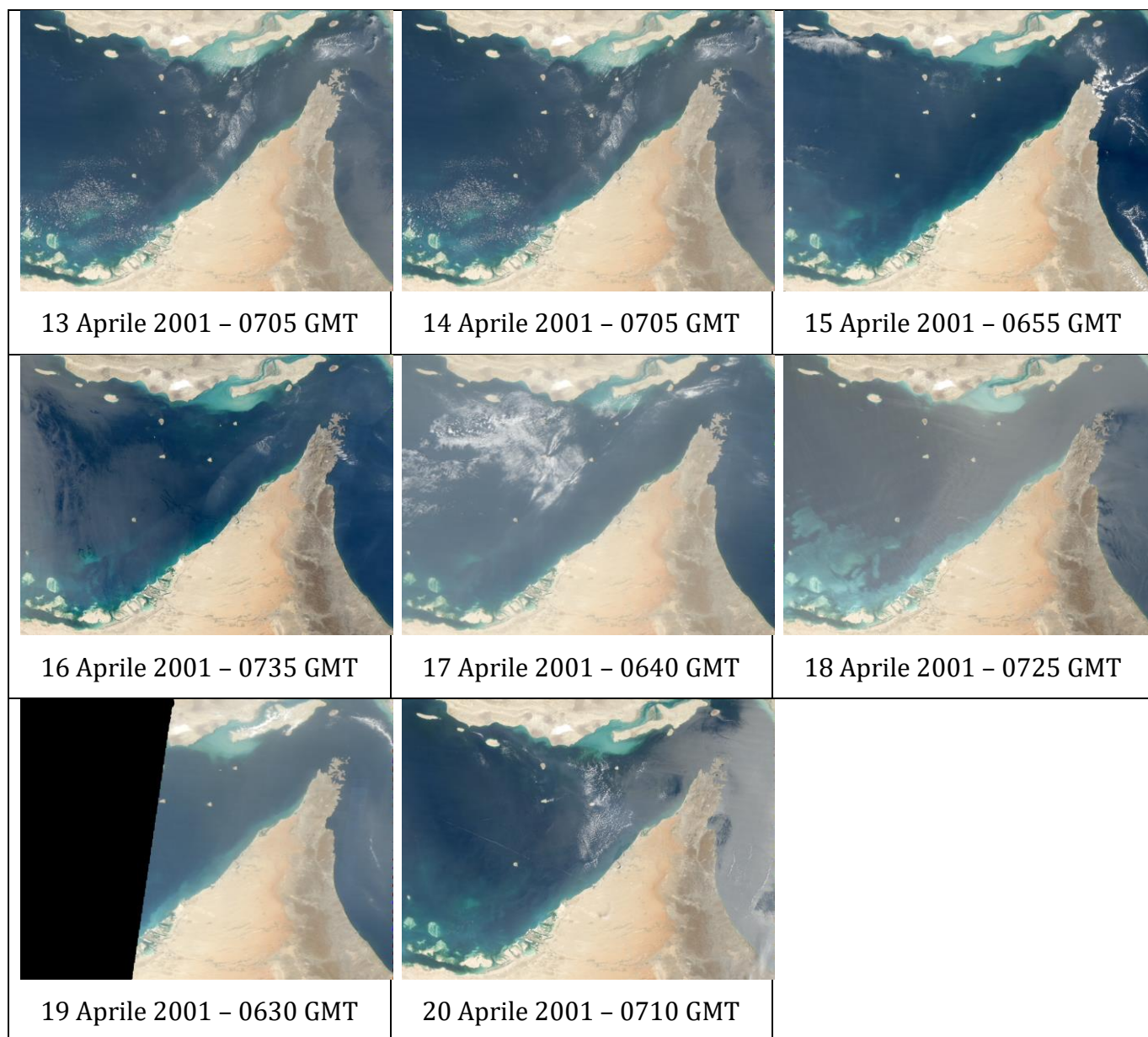


Figura 9. Sequenza temporale dal 13 al 20 Aprile 2001 delle mappe RGB true color relative alla area di studio.

L'analisi visuale della sequenza di immagini non sembra evidenziare alcun segnale particolare. Si è pertanto deciso di zoomare più dettagliatamente sulla regione probabilmente interessata dallo *spill* e focalizzarsi sulle immagini del 15 e 16 Aprile 2011 (Figura 10).

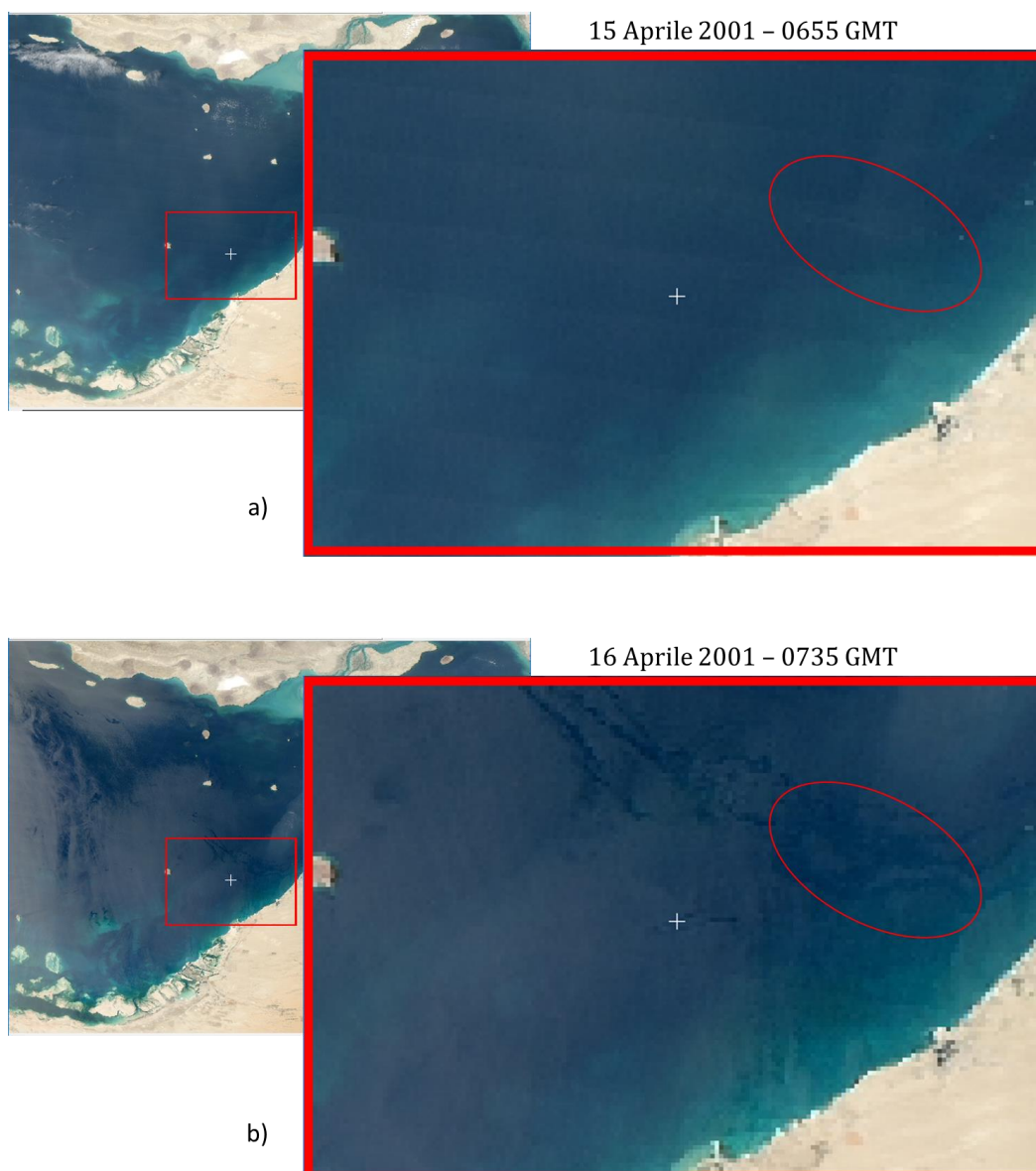


Figura 10. Ingrandimento dell'area racchiusa nel rettangolo rosso per il dato MODIS del: a) 15 Aprile 2001 - 0655 GMT; b) 16 Aprile 2001 - 0735 GMT. Le immagini RGB sono state ottenute utilizzando dati non corretti atmosfericamente.

L'immagine del 15 Aprile mostra una scarsa variabilità del segnale misurato, specialmente al largo delle coste. L'unica struttura che sembra essere presente è una sorta di filamento di contrasto positivo (molto blando) evidenziato nell'ovale rosso. Il giorno successivo una maggiore variabilità è presente, con un'alternanza di strutture a contrasto positivo e negativo, anche nello stesso ovale. Il passaggio successivo è stato l'analisi delle immagini nell'infrarosso termico. Considerati i risultati già visti utilizzando i dati nel visibile, ci si è focalizzati direttamente sulle due date considerate precedentemente (Figura 11 e 12).

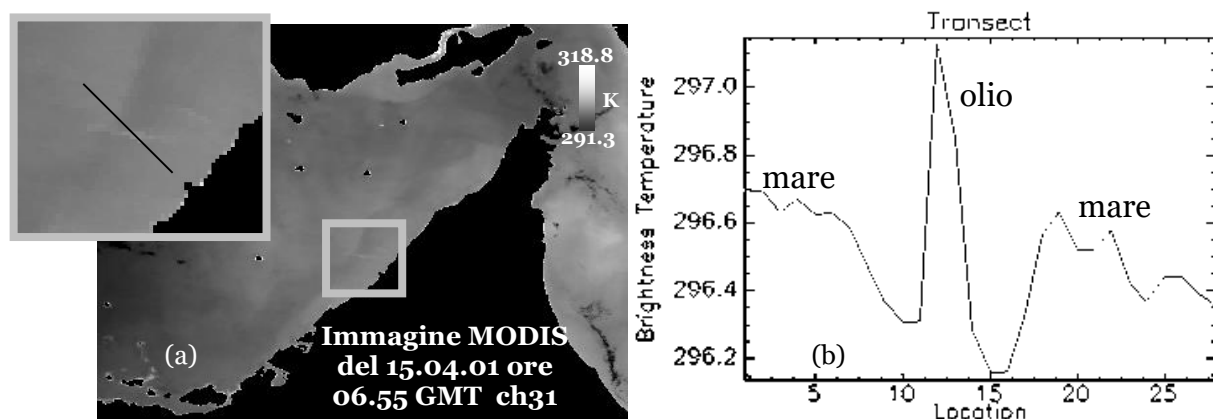


Figura 11. a) Immagine del canale 31 di MODIS per il dato del 15 Aprile 2001 – 0655 GMT; b) variazione del segnale lungo il transetto nero mostrato nell’ingrandimento in a).

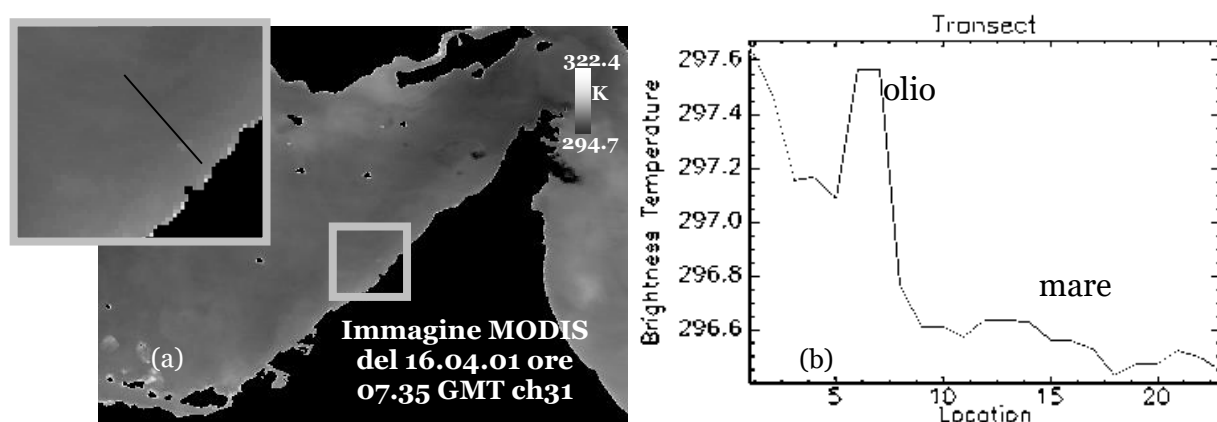


Figura 12. Come Figura 11 per il dato del 16 Aprile 2001 – 0735 GMT.

Anche in questo caso, le aree all’interno del rettangolo in corrispondenza di quella che dovrebbe essere la posizione dell’evento, mostrano una certa variabilità, seppure relativamente bassa. Quest’ultima è stata meglio quantificata tracciando e visualizzando un profilo spaziale lungo tali aree (pannello b) nelle Figure 11 e 12. Dall’analisi dei transetti si nota infatti che la presenza di una minima firma spaziale, più evidente nell’immagine del 15 Aprile ma comunque con una variazione di segnale non superiore di $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ rispetto alle acque circostanti.

Questa analisi preliminare, volta alla caratterizzazione “spettrale” completa dell’evento, è stata propedeutica per l’implementazione delle due metodologie. Nell’ambito del periodo di visita è stato ovviamente impossibile implementare la metodologia RST, che, come detto, richiede l’analisi di serie storiche pluriannuali di dati co-locali nel dominio spazio-temporale, mentre è risultato più facile provare ad applicare la metodologia MIST, almeno relativamente agli step iniziali. In Figura 13 sono infatti plottate le due immagini Rrc corrispondenti ai dati finora considerati, ottenute utilizzando la sequenza di bande indicata in tabella II.3. Queste immagini coincidono con quelle già mostrate in Figura 10 a meno della correzione per l’effetto di *Rayleigh*.

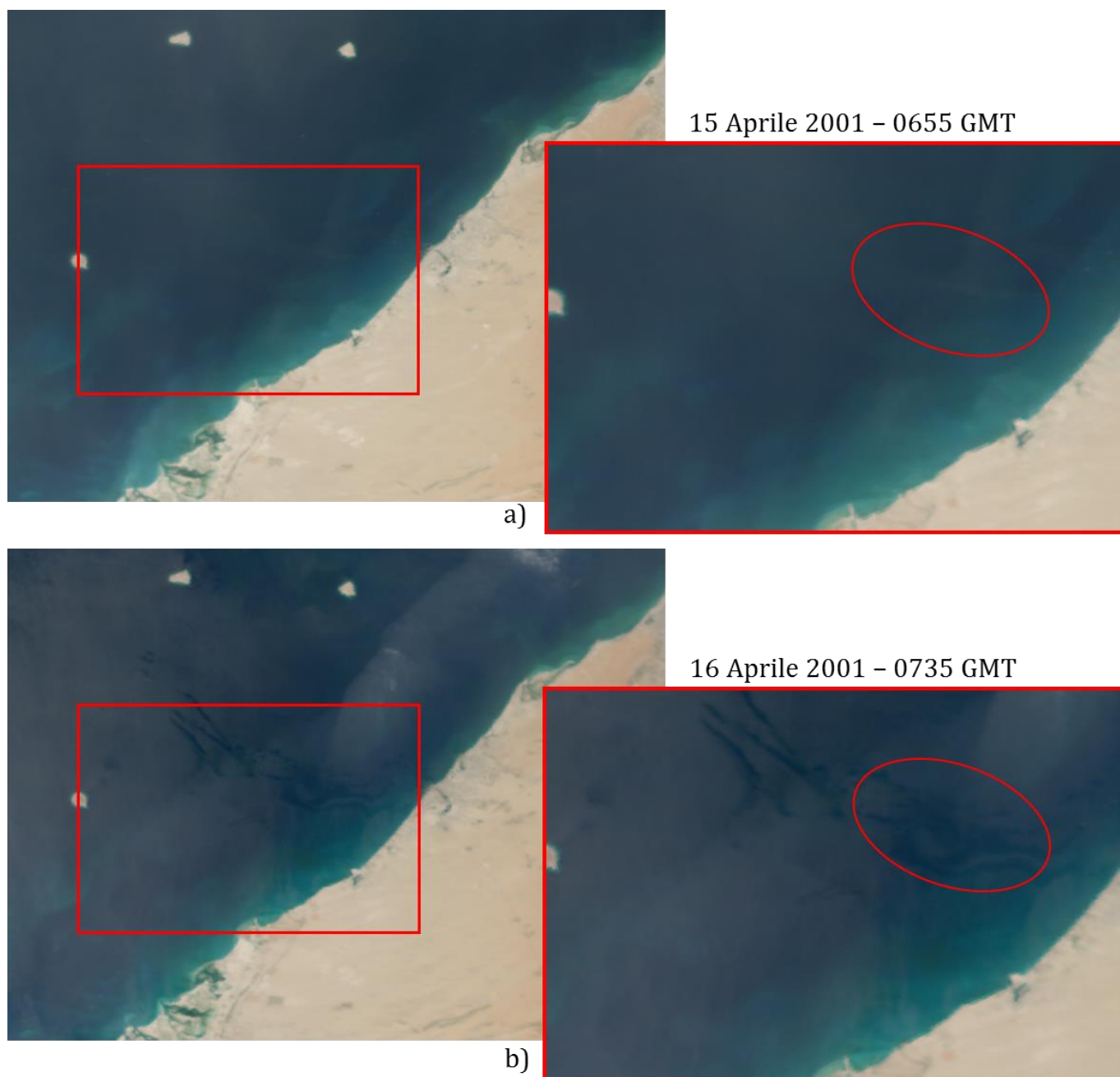


Figura 13. Ingrandimento dell'area racchiusa nel rettangolo rosso per il dato MODIS del: a) 15 Aprile 2001 - 0655 GMT; b) 16 Aprile 2001 - 0735 GMT. Le immagini RGB sono state ottenute utilizzando le immagini Rrc.

Esse sono state ottenute applicando sul dato level 1 la relativa routine fruibile nell'ambiente SeaDas, uno tra i software di processamento più utilizzati nell'ambito dell'Ocean Color. Ancora una volta nei due ovali sembrano essere presenti delle strutture che potrebbero essere correlate alla presenza dell'olio nelle due immagini, ma che meritano ulteriori approfondimenti, a partire dal calcolo del FAI, che saranno oggetto delle successive analisi, condotte in parallelo all'implementazione di RST.

VI. Conclusioni e sviluppi futuri

L'attività di ricerca svolta durante i 21 giorni trascorsi presso il MIST si è concentrata sulla sperimentazione di metodologie avanzate di dati satellitari per l'individuazione e il monitoraggio degli *oil spill* nell'area del Golfo Persico. L'attività si è sviluppata in differenti fasi, una prima atta al reciproco trasferimento di conoscenze e competenze sulla tematica con i componenti lo staff del gruppo di ricerca del MIST con cui si è entrati in contatto, una seconda di individuazione del caso studio e selezione e processamento di parte dei dati utili per il suo studio ed un'ultima dedicata alla analisi delle sue caratteristiche in termini di variazioni spettrali e di temperatura di brillantezza nonché all'individuazione di alcuni risultati preliminari.

L'*oil spill* relativo all'affondamento della petroliera Zainab al largo delle coste di Dubai del 14 Aprile 2011 è stato selezionato come caso studio. L'analisi condotta sulle immagini più vicine ai giorni dell'evento ha mostrato: i) una blanda evidenza del segnale legato alla presenza dell'olio nelle immagini RGB non corrette atmosfericamente; ii) una migliore sensibilità rispetto alla presenza dello sversamento nei dati acquisiti nelle bande termiche di MODIS. Questi risultati iniziali lasciano intuire che l'applicazione futura delle due metodologie alla base dei gruppi di ricerca che sono venuti a contatto grazie a questo programma di mobilità, potrà effettivamente permettere una completa caratterizzazione dell'evento investigato. L'analisi multitemporale permetterà una localizzazione robusta dello sversamento, che poi sarà più dettagliatamente descritto utilizzando le immagini corrette atmosfericamente che produrranno, infatti, un incremento della sensibilità nella individuazione del segnale dovuto alla presenza dell'olio alle lunghezze d'onda del visibile. A riguardo di quest'ultima, una prima visione delle immagini corrette atmosfericamente ha mostrato risultati simili a quelle precedenti, indicando che analisi più approfondite necessitano per poterne meglio valutare le potenzialità nell'individuare l'olio. Altri sviluppi futuri riguardano l'investigazione di altri casi test, così come l'integrazione di altri dati satellitari, anche SAR. Inoltre, sarebbe opportuno applicare dei modelli di circolazione oceanica che permettano a partire dalla individuazione, di prevedere l'eventuale evoluzione dello olio, nell'ottica di fornire quante più informazioni possibili ai responsabili della gestione delle risorse marine e delle eventuali emergenze.

VII. Valutazione critica dell'iniziativa

La qualità dell'attività di ricerca condotta nel corso della permanenza presso il *Masdar Institute of Science and Technology* (MIST), Masdar City (Abu Dhabi – UAE) è testimoniata dai seguenti indicatori oggettivi:

- Pianificazione di presentazione dei risultati ottenuti nell'ambito di questo programma di ricerca ad almeno uno dei prossimi meeting internazionali con topic specifico sulla materia (i.e., EGU 2016; IGARSS 2016; AGU FALL 2016).
- Pianificazione di sottomissione a rivista internazionale di almeno un lavoro con citazione del CNR.
- Rafforzamento della collaborazione internazionale: in particolare l'attività svolta nell'ambito di questo programma di ricerca ha permesso l'instaurarsi di un rapporto di collaborazione scientifica con Masdar Institute of Science and Technology (MIST), nella persona del Dr. M. Temimi, con cui sono stati presi accordi per il prosieguo delle attività già svolte.

VIII. Ringraziamenti

Si ringraziano:

- il CNR, per la concessione del finanziamento nell'ambito del programma di "Short Term Mobility 2015" con il quale la presente attività di ricerca è stata svolta;
- il Masdar Institute of Science and Technology (MIST), per l'ospitalità concessa durante il periodo di soggiorno ad Abu Dhabi per condurre la presente ricerca;
- il Dr. Marouane Temimi e il suo gruppo di ricerca presso il MIST, per la collaborazione fornita e per i dati messi a mia disposizione per l'analisi effettuata nell'ambito della presente ricerca.

IX. Bibliografia

Casciello D., Lacava T., Pergola N., and Tramutoli V., 2007a. Robust Satellite Techniques (RST) for Oil Spill Detection and Monitoring. In Proceedings of Fourth International Workshop on the Analysis of Multitemporal Remote Sensing Images, MultiTemp 2007, Leuven, Belgium, doi: 10.1109/MULTITEMP.2007.4293040.

Casciello D., Grimaldi C.S.L., Coviello I., Lacava T., Pergola N., and Tramutoli V., 2007b. A Robust Satellite Techniques for oil spill detection and monitoring in the optical range. In Global Monitoring for Security and Stability (GMOSS), JRC Scientific and Technical Reports, Ed. G. Zeug & M. Pesaresi, EUR 23033 EN, 294-305.

Casciello D., Lacava T., Pergola N., and Tramutoli V., 2011. Robust Satellite Techniques (RST) for oil spill detection and monitoring using AVHRR Thermal Infrared bands. *Int. J. Remote Sens.*, 32 (14), pp. 4107- 4129.

Chu P.C., Williams C.L., Clem T., Haeger S.D. and Ward M., 2008. Environmental Impact On Chemical/oil Spill In The Persian Gulf. In *Environmental Problems in Coastal Regions VII*, Edited By: C.A. Brebbia, Wessex Institute of Technology, UK, 99, 11 pages, doi: 10.2495/CENV080141.

Copernicus, 2013. Space technology reveals where oil pollutes the oceans. ESA web publication, Issue 21, September 2013 ([http://www.copernicus.eu/sites/default/files/documents/Copernicus Briefs/Copernicus Brief Issue21 OilSpill Sep2013.pdf](http://www.copernicus.eu/sites/default/files/documents/Copernicus%20Briefs/Copernicus%20Brief%20Issue21%20OilSpill%20Sep2013.pdf)).

Cross A.M., 1992. Monitoring marine oil pollution using AVHRR data: observation off coast of Kuwait and Saudi Arabia during January 1991. *Int. J. Remote Sens.*, 13, pp. 781-788.

Fingas M., and Brown C.E., 2015. Oil Spill Remote Sensing In book: *Handbook of Oil Spill Science and Technology*, Chapter: 12, Publisher: John Wiley & Sons, Editors: Merv Fingas, pp. 313-356, doi: 10.1002/9781118989982.ch12.

Grimaldi C.S.L., Coviello I., Lacava T., Pergola N., and Tramutoli V., 2009a. Near real time oil spill detection and monitoring using satellite optical data. In *Proceedings of Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2009 IEEE International*, 13-17 July 2009, Cape Town, South Africa, 4, 709-712, doi: 10.1109/IGARSS.2009.5417590.

Grimaldi C.S.L., Coviello I., Lacava T., Pergola N., and Tramutoli V., 2009b. RST-based oil spill detection and monitoring by using optical data. In *proceedings of Fifth International Workshop on the Analysis of Multi-temporal Remote Sensing Images, MultiTemp2009*, 28-30 July, University of Connecticut, USA, Editore Daniel L. Civico, 323-330.

Grimaldi C.S.L., Coviello I., Lacava T., Pergola N., and Tramutoli V., 2009c. A MODIS-based Robust Satellite Techniques for near real time oil spill detection and monitoring. In *Proceedings of the 33rd International Symposia on Remote Sensing of Environment, Sustaining the Millennium Development Goals*, 4 - 8 May 2009, Stresa, Italy; Volumes I & II, 850-853, Madison WI (USA), Omni-Press, ISBN 978-0-932913-13-5.

Grimaldi C.S.L., Casciello D., Coviello I., Lacava T., Pergola N., and Tramutoli V., 2011a. An improved RST approach for timely alert and Near Real Time monitoring of oil spill disasters by using AVHRR data. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11, 1281-1291, doi: 10.5194/nhess-11-1281-2011.

Grimaldi C.S.L., Casciello D., Coviello I., Lacava T., Pergola N., Tramutoli V., (2011b). Near Real Time Oil Spill Detection and Monitoring Using AVHRR Thermal Infrared Data, in *Marine Research at CNR, Volume DTA/06-2011*, edited by E. Brugnoli et al., pp. 1757-1771, Roma, November 2011, ISSN: 2239-5172.

Grimaldi C. S. L., Coviello I., Lacava T., Pergola N., and Tramutoli V., 2011c. A new RST-based approach for continuous oil spill detection in TIR range: The case of the Deepwater Horizon platform in the Gulf of Mexico. In *Monitoring and Modeling the Deepwater Horizon Oil Spill: A Record-Breaking Enterprise*, Geophysical Monograph Series, vol. 195, 271 pages, hardbound, ISBN 978-0-87590-485-6, AGU Code GM1954856, edited by Y. Liu et al., pp. 19-31, AGU, Washington, D. C., doi:10.1029/2011GM001105.

Hu C., 2009. A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans. *Remote Sensing of Environment*, 113, pp. 2118-2129.

Hus L., 1991. Remote sensing of oil spills in thermal infrared - Contour line effect. In *proceedings in IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS 1991*, 3, 1315-1317.

Leifera I., Lehrb W.J., Simecek-Beattyb D., Bradleyc E., Clarkd R., Dennison P., Huf Y., Mathesone S., Jonesg C.E., Holtg B., Reifh M., Robertsc D.A., Svejkovskiy J., Swayzed G., and Wozencrafth J., 2012. State of the art satellite and airborne marine oil spill remote sensing: Application to the BP Deepwater Horizon oil spill, *Remote Sensing of Environment*, 124pp. 185-209.

Maribus gGmbH, 2010. *World Ocean Review. Living with the oceans*. 236 pp, ISBN 978-3-86648-012-4 (http://worldoceanreview.com/wp-content/downloads/wor1/WOR1_english.pdf).

McKenzie B., 2003. Zainab Incident and Developments in Oil Spill Response Programs after the Incident. In *Proceedings of PAJ Oil Spill Symposium 2002: Various Approaches Towards the Oil Spill*, 9 Pages.

Nirchio F., Pandiscia G., Ruggieri G., Santoleri R., Tataranni F., Giancaspro A., Trivero P., Pinardi N., Masini A., Castellani C., 2009. Cosmo-Skymed contribution in oil spill monitoring of the Mediterranean Sea. In:

Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2009 IEEE International, IGARSS 2009, pp: II-781 - II-784, DOI: 10.1109/IGARSS.2009.5418209.

OPEC, 2014. Annual Statistical Bulletin. Author. (https://www.opec.org/opec_web/static_files_project/media/downloads/publications/ASB2014.pdf).

Salisbury J.W., D'Aria D.M., and Sabins F.F. Jr., 1993. Thermal infrared remote sensing of crude oil slick, Remote Sens. Environ., 45(2), pp. 225-231.

Steven L., 2015. Visualising spill risk: Understanding and assessing regions of heightened vulnerability associated with increased seaborne transport of oil, INTERSPILL 2015, 24-26 March 2015, Amsterdam (http://www.itopf.com/fileadmin/data/Documents/Papers/INTERSPILL15_LisaStevensPoster.pdf).

Tramutoli V., 1998. Robust AVHRR Techniques (RAT) for Environmental Monitoring: theory and applications. In Earth Surface Remote Sensing II, edited by G. Cecchi, and E. Zilioli, proceedings of SPIE, 3496, pp. 101-113.

Tramutoli V., 2005. Robust Satellite Techniques (RST) for natural and environmental hazards monitoring and mitigation: ten years of successful applications. In The 9th International Symposium on Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing, Shunlin Liang, Jiyuan Liu, Xiaowen Li, Ronggao Liu, Michael Schaepman (eds), ISPRS: Beijing (China); Vol. XXXVI (7/ W20), 792–795. ISSN 1682–1750.

Tramutoli V., 2007. Robust Satellite Techniques (RST) for Natural and Environmental Hazards Monitoring and Mitigation: Theory and Applications. In Fourth International Workshop on the Analysis of Multitemporal Remote Sensing Images, Louven, Belgium, doi: 10.1109/MULTITEMP.2007.4293057.

Zhao J., Temimi M., Ghedira H., and Hu C., 2014. Exploring the potential of optical remote sensing for oil spill detection in shallow coastal waters – a case study in the Arabian Gulf. Optics Express, 22(11): pp. 13755–13772.

Zhao J., Temimi M., Al Azhar M., and Ghedira H., 2015. Satellite-Based Tracking of Oil Pollution in the Arabian Gulf and the Sea of Oman, Canadian Journal of Remote Sensing, 41:2, pp. 113-125, doi: 10.1080/07038992.2015.1042543.

Tito Scalo, 04/02/2016

Firma del Fruitore

Dr. Teodosio Lacava