

RICOSTRUZIONE E PREVISIONE DELLA TEMPESTA DEL PARSIFAL

Luciana Bertotti y Luigi Cavaleri ¹, Paolo De Girolamo y Stefano Magnaldi ², Leopoldo Franco ³

RIASSUNTO: Il 2 novembre 1995 l'imbarcazione a vela di 16 m "Parsifal" affondò durante una tempesta di Maestrale al largo di Minorca nel Golfo del Leone provocando la morte di sei dei nove membri dell'equipaggio. Si analizza la tempesta con differenti modelli numerici meteorologici e di moto ondoso, confrontando i risultati con le misure disponibili da boe e da satellite. Si prendono poi in considerazione le previsioni della tempesta e le informazioni disponibili durante i giorni precedenti all'incidente. Infine si discute sulla situazione attuale dei sistemi di ricostruzione e previsione del campo di vento e del moto ondoso nel Mar Mediterraneo, nonché sulla distribuzione di queste informazioni al pubblico.

INTRODUZIONE

Il 2 novembre 1995, alle ore 21:00 UTC, la barca a vela italiana di 16 m denominata Parsifal affondò nel Mediterraneo Occidentale, tra le isole Baleari e la Sardegna, durante le fasi preliminari di una regata transoceanica. Sei dei nove membri dell'equipaggio persero la vita nell'incidente. L'evento suscitò accesi dibattiti sui giornali e sulle riviste specializzate di nautica. Eccezionali condizioni dell'intensità del vento e del moto ondoso furono ripetutamente indicate come la causa principale della disgrazia.

Per rispondere correttamente ad alcuni interrogativi sorti dopo l'incidente, si è eseguita una dettagliata analisi di questa "tempesta del Parsifal", considerando la sua ricostruzione con differenti modelli numerici meteorologici e di moto ondoso. Abbiamo anche analizzato la previsione delle condizioni di vento e delle onde disponibili nei giorni precedenti, sottoponendo i risultati ad un confronto con i dati misurati disponibili relativi alla zona d'interesse.

L'articolo è organizzato come segue. Dopo la descrizione generale della situazione meteorologica, sono riportate le misure disponibili. Seguono poi: l'elenco e la breve descrizione dei modelli meteorologici e di moto ondoso utilizzati per lo studio; il confronto dei risultati dei modelli con i dati misurati e la stima delle condizioni di moto ondoso nel momento e nel luogo dell'incidente; la discussione sui dati di previsione disponibili nei giorni precedenti; infine, la sintesi dei risultati conseguiti con questo lavoro unitamente ad alcune considerazioni sulla questione della distribuzione al pubblico dell'informazione sulla previsione del moto ondoso.

LA SITUAZIONE METEOROLOGICA

La situazione meteorologica alle 18:00 UTC del 2 novembre 1995 è riprodotta nella carta del tempo in figura 1. Un fronte freddo procedente verso sud, associato ad una depressione localizzata nel Mar Mediterraneo occidentale, produceva un intenso flusso di aria fredda proveniente da nord. Questa situazione determina una tipica tempesta da Maestrale con forti venti nel Golfo del Leone e nell'area marina tra le Baleari e la Sardegna. L'interazione tra l'aria fredda e l'acqua ancora calda della superficie marina produce condizioni di forte instabilità e turbolenza dell'aria, con una più attiva generazione del moto ondoso.

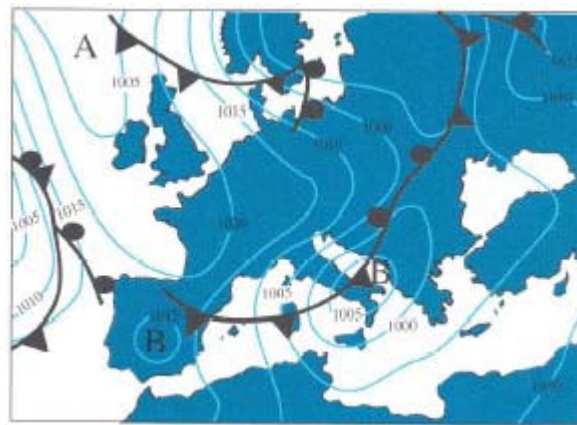


Figura 1: La situazione meteorologica in Mediterraneo alle ore 18:00 UTC del 2 Novembre 1995. Isobare con 5 inbar di intervallo.

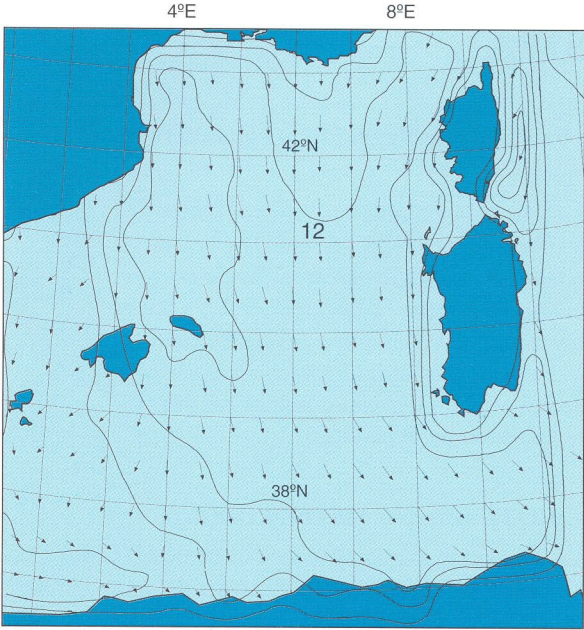
¹ Istituto Studio Dinamica Grandi Masse - CNR, S.Polo 1364, 30125 Venezia, Italia
e-mail: gigi@isdgm.ve.cnr.it. tel.39-41-5216864

² Dipartimento di Idraulica, Trasporti e Strade, Università di Roma "La Sapienza", via Eudossiana 18, 00184 Roma, Italia
e-mail: padegi@cidra.ing.uniroma1.it

³ Dipartimento di Scienze dell'Ingegneria Civile- Terza Università di Roma, via C.Segre 60, 00146 Roma, Italia
e-mail: leofranc@fenice.dsic.uniroma3.it

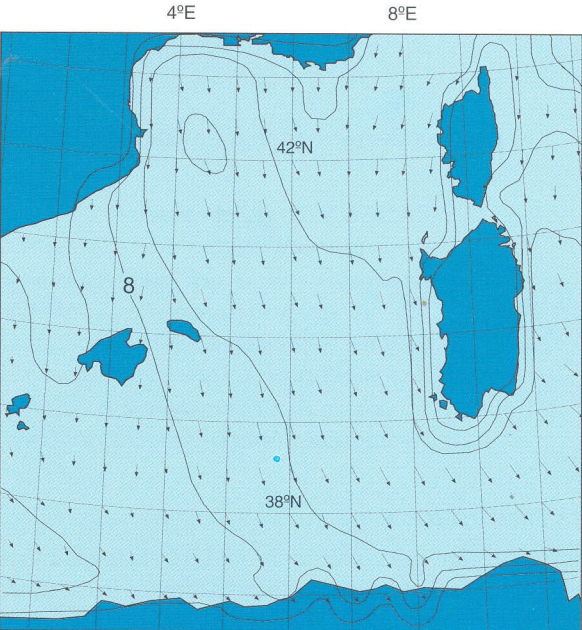
Artículo publicado en *Ingeniería del Agua*. Vol.4 Num.3 (septiembre 1997), páginas 13-22 recibido el 3 de diciembre de 1996 y aceptado para su publicación el 21 de julio de 1997. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo. En el caso de ser aceptadas, las discusiones serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores en el primer número de la revista que aparezca una vez transcurrido el plazo indicado.

MEDITERRANEAN SEA -10M WIND AT 1985.11.02. 21 UT



UKMO ANALYSIS

MEDITERRANEAN SEA -10M WIND AT 1985.11.02. 21 UT



ECMWF ANALYSIS

Figura 2: Il campo di vento sul Mar Mediterraneo Occidentale alle 21:00 UTC del 2 Novembre 1995, secondo le analisi UKMO-LAM e ECMWF. Curve di uguale intensità con 4 m/s di intervallo.

Per ricostruire questa tempesta si sono considerati dati forniti da due differenti centri meteorologia, denominati European Centre for Medium-Range Weather Forecast, a Reading, U.K. (successivamente indicate con ECMWF), e U.K. Meteorological Office, a Bracknell, U.K. (indicato con UKMO). I due campi di vento, corrispondenti alle 21:00 UTC del 2 novembre 1995, sono riportati in *Figura 2*. Il campo ECMWF, dal momento che nel relativo archivio le analisi sono disponibili solo ad intervalli di 6 ore (00, 06, 12, 18 UTC), è stato ottenuto con una interpolazione lineare tra il campo precedente e quelle successive. In questo caso, rispetto alla direzione tipica da nord-ovest delle tempeste di Maestrane, riscontriamo una più intensa componente nord-sud, orientata direttamente dalla valle del Rodano verso le isole Baleari.

Tenendo conto degli obiettivi di questo studio, si è posta l'attenzione principalmente sulla situazione del 2-3 novembre. Peraltro già il giorno 41' area in esame è stata investita da un'altra tempesta simile, ma più intensa, determinata dal fronte, visibile in figura 1, localizzato nella zona nordorientale dell'Oceano Atlantico e nel Mare del Nord.

	Símbolo	latN	long E	Fondale (m)
Parsifal	P	40.39	5.2	2500
Alghero	A	40.32	8.06	100
Mahon	M	39.43	4.26	300
Cap de Pera	C	39.39	3.28	48

Tabella 1: Coordinate geografiche e fondale nei punti riportati in figura 3

DATI MISURATI DISPONIBILI

La posizione degli strumenti di misura del moto ondoso disponibili è indicata in *Figura 3*. Tre boe accelerometriche sono localizzate ad Alghero (A), Mahon (M) e Cap de Pera (C). La boa in A fa parte della Rete Ondametrica Nazionale italiana (RON) gestita dal Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale (SIMN). Le boe in M e C sono gestite dal servizio spagnolo Clima Marítimo, Puertos del Estado. La *Tabella 1* indica le coordinate geografiche e la profondità per ciascuna localizzazione.

Le boe ondametriche, essendo di tipo direzionale, forniscono una misura degli spettri d'energia del moto ondoso 2D e 1D e, tra gli altri, i seguenti principali parametri integrali: altezza significativa spettrale $H_{mo} = \sqrt{H_s}$, periodo medio T_m e di picco T_p , direzione media q_m . Poiché nell'area di interesse le condizioni erano puramente generative, con effetti costieri non rilevanti, come risulta evidente dai dati, la forma spettrale è simile alla classica forma JONSWAP (Hasselmann *et al.*, 1973). Si è posta l'attenzione sugli aspetti quantitativi dell'evento, in particolare su H_s e, secondariamente, su T_p o T_m e q_m . Questi dati sono disponibili

Modelli d'onda	Modelli meteorologici	
	ECMWF	UKMO-LAM
EWM		fit
WAM	fit	fit
HYDRUS		fit

Tabella 2: Combinazioni tra modelli meteorologici e di moto ondoso considerate in questo studio

bili ad intervalli di 3 ore, in corrispondenza delle ore sinottiche (00, 03, 06,... UTC).

La boa in M sarebbe stata la più interessante, essendo localizzata lungo la direzione principale della tempesta ed essendo la più vicina al punto di affondamento. Inoltre essa è equipaggiata anche con un anemometro. Purtroppo le sue registrazioni si interruppero nella prima fase della tempesta. Comunque, i pochi dati disponibili mostrano bene la rapida crescita della velocità del vento U fino a 18.5 m/s e dell'altezza significativa fino a 4.76 m.

Una seconda fonte di dati è costituita dal satellite Topex (indicate nel seguito con T/P). La sua traiettoria alle ore 04:55 UTC del 3 novembre 1995 durante una fase orbitale discendente è anche indicata in *Figura 3*. Partendo da poche decine di chilometri dalla costa, le stime di H_s sono disponibili ad intervalli di circa 7 Km (ovvero ogni secondo), ma in *Figura* è riportato per semplicità un punto di rilievo ogni tre (spaziatura di circa 20 km).

MODELLI METEOROLOGICI E DI MOTO ONDOSO

I campi di vento nel Mar Mediterraneo sono resi disponibili da modelli meteorologici globali, tra cui i già citati ECMWF e UKMO. Il modello di ECMWF (descritto da Simmons, 1991) opera con una risoluzione pratica di 90 Km. Anche UKMO (Cullen, 1991) utilizza una griglia con una risoluzione di circa 90 Km a 40 gradi di latitudine, ma opera anche con un modello ad "area limitata" (LAM), con circa 45 Km di risoluzione, esteso anche a tutto il Mar Mediterraneo. I due campi di vento in *Figura 2* riportano rispettivamente i risultati di UKMO-LAM e ECMWF.

Questi campi di vento sono stati utilizzati come input dei modelli di moto ondoso. Si sono considerati i risultati di tre differenti modelli d'onda, corrispondenti ai differenti campi di vento. UKMO utilizza un proprio modello d'onda di II generazione, EWM, descritto da Golding (1983). Il più complesso modello WAM di III generazione ("3G") è utilizzato regolarmente nei più importanti centri meteorologici ed oceanografici. Esso è ampiamente descritto in letteratura (cfr. i due classici riferimenti: WAMDI Group, 1988 e Komen *et al.*, 1994, mentre un utile riferimento spagnolo è PCM, 1991). Infine HYDRUS è un recente modello di II generazione avanzata ("quasi-3G") descritto da Magnaldi & Ferrauto (1996).

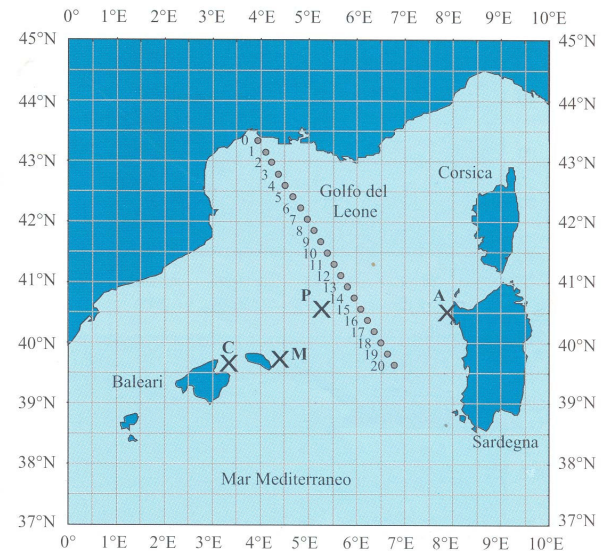


Figura 3: Posizione dei dati disponibili. Boe di Alghero (A), Mahon (M) e Cap de Pera (C). Traiettoria del satellite T/P diretto a sudest transitato alle 04:55 UTC del 3 Novembre 1995 (punti numerati ogni 20 km). P rappresenta il punto di affondamento del Parsifal.

Tutti questi modelli d'onda sono spettrali, ovvero analizzano l'evoluzione nel tempo e nello spazio di ogni singola componente (frequenza e direzione) dello spettro d'onda. Vengono considerati tutti i principali processi fisici generativi, dissipativi ed avvevativi del moto ondoso; le differenze si trovano soprattutto nel grado di approssimazione con cui viene calcolato il termine non lineare nell'equazione di bilancio dell'energia. Per il lettore interessato il riferimento di base è Komen *et al.* 1994, che fornisce una discussione completa di tutti gli aspetti della modellazione dello spettro d'onda.

In pratica la qualità media dei risultati è sufficientemente buona per tutti e tre i modelli. Differenze sostanziali si presentano essenzialmente in situazioni complicate. I modelli d'onda avanzati 3G sono allo stato attuale più accurati dei modelli meteorologici. La qualità dei risultati in termini di caratteristiche ondamiche dipende essenzialmente dalla qualità dei campi di vento di input. Questo è particolarmente vero nelle situazioni semplici, come quella della tempesta del Parsifal, con un ben de-

Ora	Velocità del vento (m/s)			Direzione del vento (gradi N)		
	Mahon	UKMO	ECMWF	Mahon	UKMO	ECMWF
2/11/95						
15 UTC	13	12.0	9	329	347	336
18 UTC	14.5	14	10.5	330	353	338
21 UTC	18.5	16.5	12.0	331	352	340

Tabella 3: Paragone tra le misure ed i modelli di vento a Mahon (vedi figura 3 per la sua posizione)

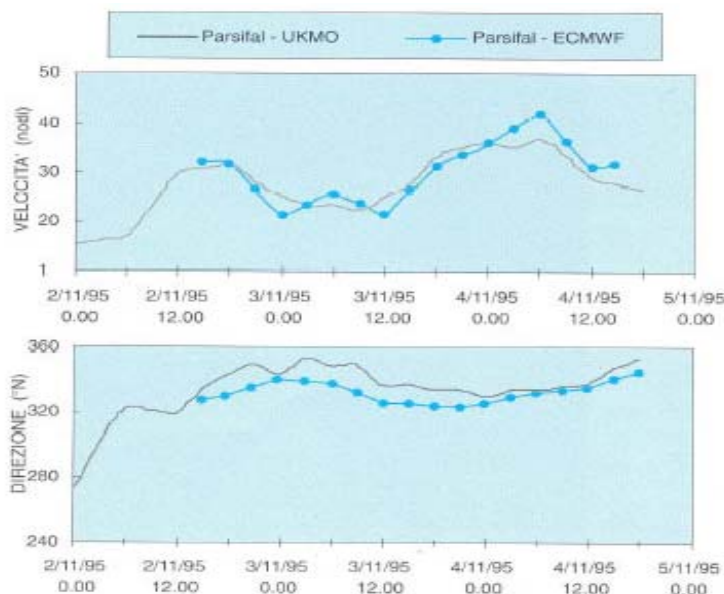


Figura 4: Serie temporali della velocità e direzione del vento nel punto Parsifal, ottenute con le analisi UKMO-LAM e ECMWF.

finito campo di vento che spirava stabilmente dalla costa del Golfo del Leone verso il largo. Per questo caso classico è da attendersi che tutti i modelli d'onda diano risultati simili, dal momento che la loro qualità dipende essenzialmente da quella del vento.

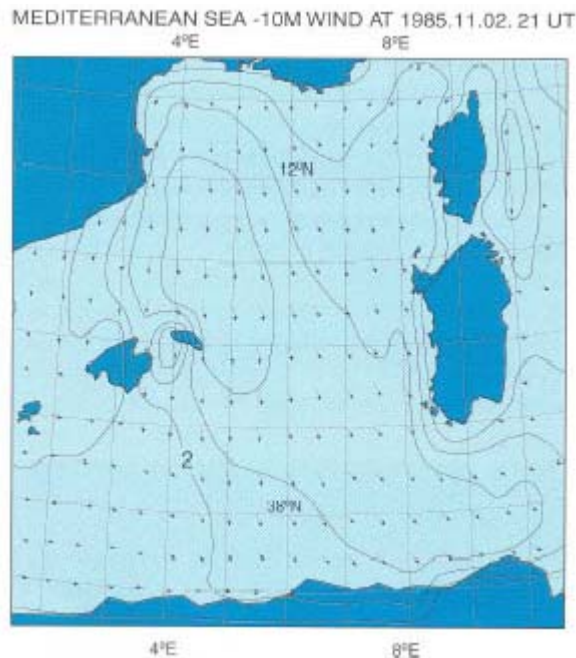


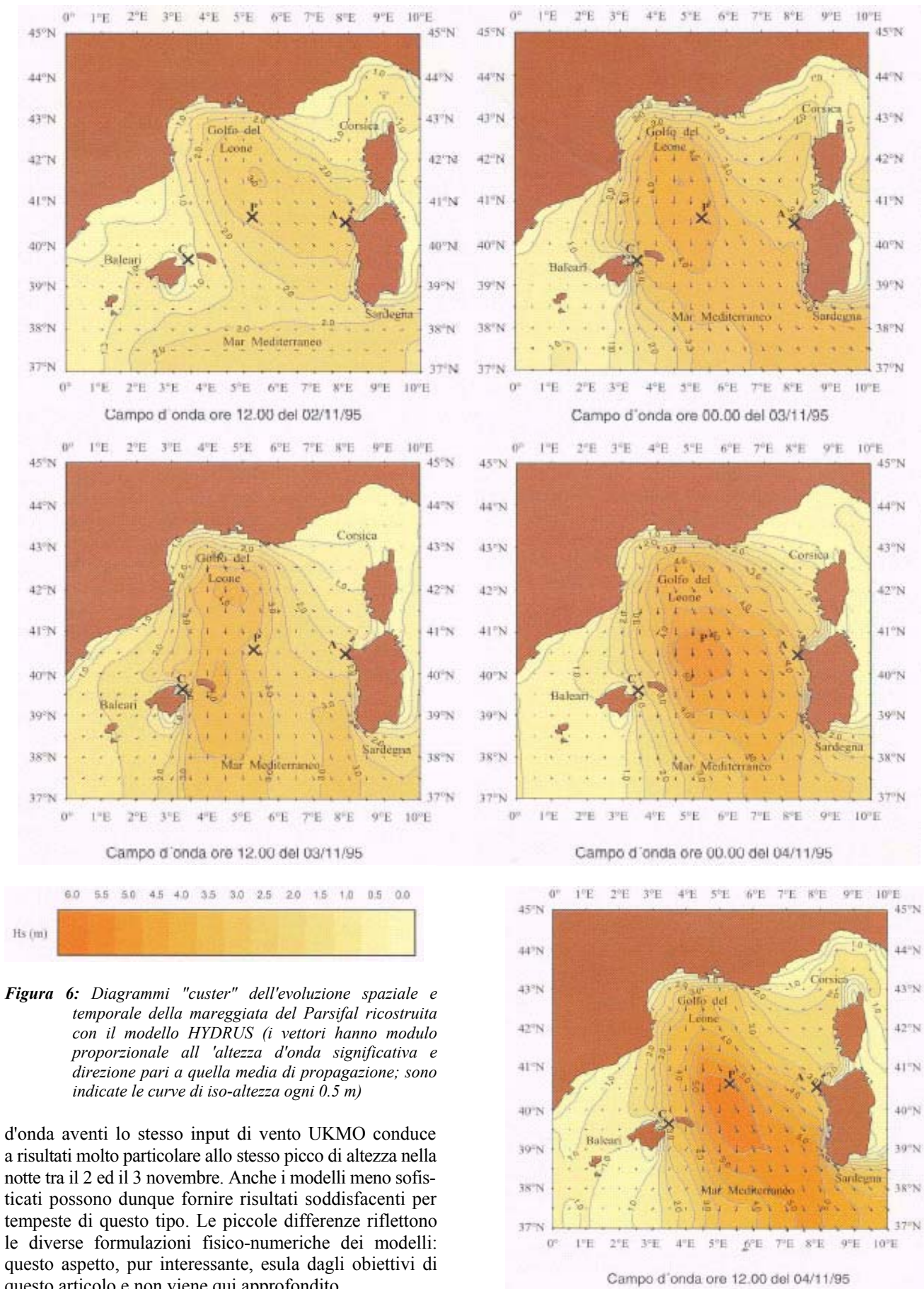
Figura 5: Campo d'onda alle ore 21:00 UTC del 2 novembre 1995 ottenuto dalla combinazione di modelli UKMO-LAM / WAM. Isolinee di altezza significativa ad intervalli di 1 m.

Per quanto riguarda i tempi di calcolo, utilizzando uno spettro di energia con 12 direzioni e 25 frequenze, con un passo temporale di 15 minuti e su una griglia di 4500 punti, un intervallo di un giorno viene girato dal modello WAM con 2 minuti di CPU su FUJITSU 700 con un processore vettoriale; il tempo di calcolo si riduce di circa il 10% con il modello HYDRUS.

La Tabella 2 illustra le differenti combinazioni dei modelli meteorologici e di moto ondoso utilizzati nelle prove. Inoltre, con il vento ECMWF, il WAM è stato girato nei due casi di 0.50 e 0.25 gradi di risoluzione. Comunque, in considerazione della semplicità del caso e della geometria della tempesta, non si sono ottenute differenze sostanziali. Questo aspetto non sarà pertanto discusso nel seguito.

Il campo di vento alle 21:00 UTC del 2 novembre 1995 è riportato in Figura 2a-b, rispettivamente per UKMO-LAM e ECMWF. Come atteso, i due campi sono simili, con il già menzionato flusso di aria fredda proveniente da nord. Comunque delle differenze sono visibili. Il campo ECMWF ha una componente di flusso verso Est, mentre quello UKMO-LAM è caratterizzato da una direzione pienamente orientata da Nord a Sud. Pertanto ECMWF pone il Parsifal al centro del flusso, mentre nell'altro caso il punto di affondamento risulta un poco spostato lateralmente. Ciò compensa più o meno la velocità del vento più alta nel campo UKMO-LAM, dove l'area con $U > 16$ m/s è molto più grande che per ECMWF. Alla fine, i due modelli indicano una simile evoluzione delle condizioni di vento nel punto Parsifal, come mostrato in Figura 4. Comunque, poiché le onde sono un effetto integrato nello spazio e nel tempo del campo di vento, si determinano differenze nelle stime delle condizioni d'onda.

Il campo d'onda alle 21:00 UTC del 2 novembre 1995, per la combinazione UKMO-LAM/WAM, è riportato in Figura 5. L'andamento riflette quello del campo di vento in Figura 2. Le curve di uguale altezza d'onda, con intervallo di 1 m, mostrano un progressivo incremento dell'altezza a partire dalla costa franco-spagnola. Nel punto Parsifal l'altezza d'onda significativa risulta pari a circa 4 m. Analoghi diagrammi sono ottenuti dal modello HYDRUS: la Figura 6 mostra l'evoluzione spazio-temporale (ogni 12 ore) del campo d'onda con evidente propagazione sottovento dell'ampio picco centrale ed i forti gradienti d'altezza presso le isole ai margini laterali del bacino. Le differenze tra i risultati dei vari modelli sono evidenziate in Figura 7, che mostra la storia temporale della H_s nel punto P. Si osserva una sistematica sottostima dell'onda derivata dal meno intenso campo di vento ECMWF, tranne che alla fine del periodo in occasione del secondo picco. Si conferma pertanto che il modello con maggiore risoluzione spaziale (UKMO-LAM) produce, soprattutto nei bacini chiusi ed in zone con forti gradienti, ad un aumento della velocità del vento e quindi dell'altezza d'onda. L'uso dei tre modelli



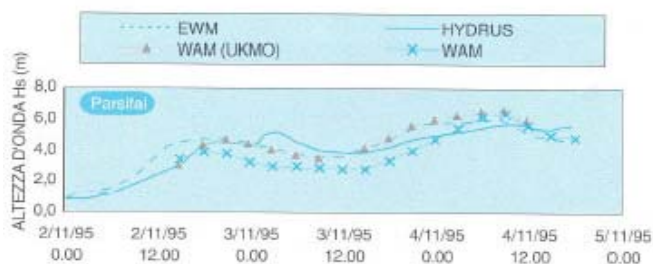


Figura 7: Serie temporali della altezza significativa nel punto Parsifal, ottenute con differenti combinazioni di modelli meteorologici e di moto ondoso.

CONFRONTO CON IDATIMISURATI

Il paragone dei risultati dei modelli di vento con le poche misure disponibili conferma le considerazioni generali fatte nel paragrafo precedente. Le elevate velocità del vento registrate a Mahon (18.5 m/s al momento dell'incidente) sono ben riprodotte da UKMO (16.5 m/s), ma piuttosto sottostimate da ECMWF (12.0 m/s), che converge il flusso principale al centro del bacino. Conseguentemente, come per i dati nel punto Parsifal mostrati in figura 4, entrambi i modelli meteorologici forniscono simili velocità del vento (12-14 m/s) lungo la traiettoria del T/P, con solo una piccola sottostima rispetto alle misure del satellite. Circa la direzione, le differenze tra i dati dei modelli e quelli misurati sono limitate al massimo a circa 20 gradi. Comunque la vicinanza dell'isola di Minorca, non ben rappresentata nei modelli meteorologici, impedisce una definizione più precisa.

Nei riguardi dell'altezza d'onda, si considerano in primo luogo i dati delle boe, in particolare quelli in A e C (v. Figura 3). Le serie temporali disponibili in M, co-

munque informative, sono troppo corte per ben definire l'evoluzione della tempesta. Le serie temporali della H_s modellata e misurata sono riportate in Figura 8. Come atteso, le differenze dovute all'utilizzo di differenti modelli meteorologici e d'onda sono simili a quelle già mostrate per il punto Parsifal, con una sottostima più pronunciata di ECMWF a Cap de Pera, come conseguenza della geometria del campo di vento. Un aspetto interessante è la drastica sottostima di H_s ad Alghero, dove i risultati della modellazione sono più bassi rispetto alle misura con una percentuale tra il 20% ed il 40%

sull'intero intervallo di tempo. In accordo con la semplice geometria della tempesta (vento che spira dalla costa verso il largo) e con le regole basilari della generazione del moto ondoso dovuta al vento (Hasselmann *et al.*, 1973), una minore, ma simile, sottostima si riscontra anche per il periodo dell'onda. La direzione ottenuta dai modelli d'onda riflette pienamente quella dei campi di vento in input.

Questi risultati non rappresentano una sorpresa. Pontes *et al.* (1996), durante un esteso studio delle condizioni d'onda lungo le coste europee, hanno analizzato numerose serie di dati modellati e misurati. In particolare l'analisi di tre anni di dati ad Alghero ha mostrato una sottostima media dell'altezza d'onda calcolata dell'ordine del 30%. Come commentato più eslesamente nelle conclusioni, il punto chiave è la scarsa intensità delle velocità del vento. Quello che è piuttosto strano è la modesta prestazione anche del modello meteorologico UKMO-LAM ad alta risoluzione, che non mostra in questo caso alcun sostanziale vantaggio rispetto al modello ECMWF a maglia più larga. Una possibile spiegazione sta ancora nella geometria del campo di

vento che nel caso di UKMO-LAM (Figura 2 a) mostra una ben definita direzione NordSud, con limitate velocità del vento e lunghezze del fetch nella posizione di Alghero. Questa ipotesi è confermata dalla direzione locale misurata delle onde, deviata di circa 30 gradi in senso orario rispetto al vento. Dal momento che nelle condizioni di mare vivo, come in questo caso, le onde si muovono prevalentemente nella direzione del vento, questo è un chiaro indice di errore nei risultati del modello di vento (non solo come velocità ma anche come direzione).

Il paragone è più positivo a Cap de Pera, dove l'utilizzo del vento UKMO porta a buoni risultati in tutti e tre i modelli d'onda. E' da notare come, utilizzando il vento ECMWF, si ottiene una drastica sottostima della marea nella zona più ad Ovest. La sottostima è più pronunciata per H_s che per il periodo (non riportato), perché l'energia si disperde fuori dalla linea d'azione principale della tempesta.

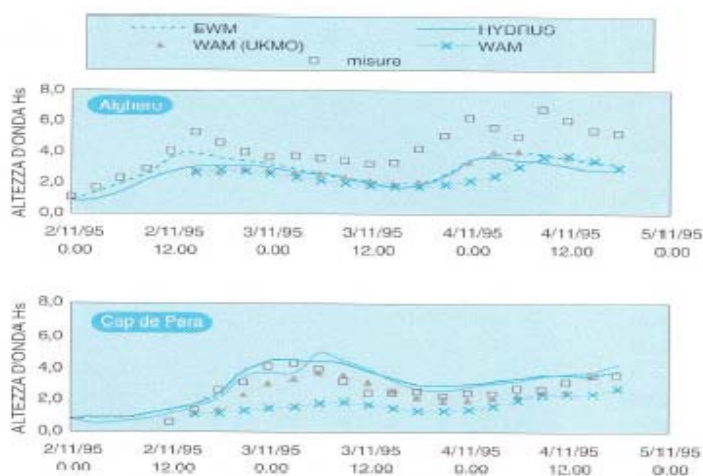


Figura 8: Confronto tra le altezze d'onda calcolate e misurate a Alghero (a) e Cap de Pera (b).

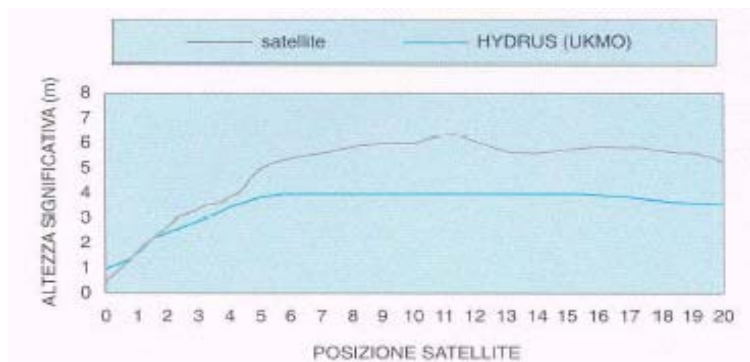


Figura 9: Confronto tra l'altezza significativa calcolata con il modello HYDRUS e le misure del satellite Topex, lungo la traiettoria riportata in figura 3 (posizioni ogni 20 km circa).

Un altro argomento convincente riguardo alla sottostima della velocità del vento da parte dei modelli meteorologici è fornita dalla *Figura 9*, dove vengono paragonati i risultati del modello HYDRUS con le misure di H_s fornite dal satellite Topex lungo la rotta riportata in *Figura 3*. Come detto precedentemente, un corretto modello d'onda, come è il caso dei tre modelli qui considerati, difficilmente può dare risultati errati in una situazione semplice come questa. La notevole sottostima media della H_s di circa il 30% (4 m invece di 6 m) deve essere attribuita essenzialmente ad un basso valore della velocità del vento in input. L'accuratezza delle misure altimetriche T/P, che si ritiene sottostimino la reale H_s del 5% circa (Cotton, comunicazione personale), non è essenziale ai fini di questa analisi. Una valutazione quantitativa della sottostima del vento può essere ottenuta considerando che H_s dipende linearmente dalla U in condizioni di fetch limitato, a poca distanza dalla costa. Più al largo, con "mare sviluppato" si determina una dipendenza quadratica (circa dopo il punto 10 nella *Figura 3*). Ciò suggerisce una valutazione complessiva della sottostima della velocità del vento tra il 15% ed il 20%.

LA SITUAZIONE NEL PUNTO DI AFFONDA- MENTO DEL PARSIFAL

I risultati dei modelli sono riportati in *Figura 7*. Utilizzando i venti UKMO-LAM, i modelli d'onda concordano sostanzialmente con il valore tra 4.6 m e 4.8 m per H_s al momento dell'incidente. Tuttavia i dati delle boe e del satellite suggeriscono che le condizioni locali erano più severe. Queste conclusioni concordano con le precedenti statistiche (Pontes *et al.*, 1996). Considerando una sottostima del 30% dell'altezza significativa, valore questo coerente con tutte le informazioni disponibili, si può stimare che una H_s compresa tra 6.5 m e 7 m era presente nell'area del Parsifal nella tarda sera del 2 Novembre 1995. Per giudicare sulla "eccezionalità" di questi valori si può ricordare che il 4 Novembre, solo 36 ore dopo l'incidente, sono state misurate e calcolate altezze d'onda con un valore di oltre il 20% superiore rispetto a quelle verificatesi durante la "tempesta del Parsifal".

LE PREVISIONI

È certamente interessante contrallare anche le previsioni disponibili nei giorni precedenti all'incidente. ECMWF predispone ogni giorno la previsione meteorologica per i successivi dieci giorni. Tutti i risultati mostrati finora sono stati ottenuti usando le cosiddette "analisi", ovvero stime ottenute a posteriori, sulla base di tutti i dati disponibili forniti da modelli e misure. In teoria queste elaborazioni forniscono la stima migliore possibile, ma non ci informano sulle previsioni che erano disponibili all'epoca. Per verificare queste ultime sono state considerate le sequenze dei campi di vento attesi a suo tempo ogni giorno per il giorno successivo. In pratica si utilizzano i cosiddetti campi di vento "1-d forecast" per girare il modello WAM. Questo permette di ricostruire la previsione dei vari eventi su tutto il bacino regolarmente fornita con 24 ore d'anticipo (ed anche 48 e 72 ore). La stessa cosa non è stata possibile con UKMO-LAM poiché il centro UKMO non archivia la previsione del LAM.

In *Figura 10* si confrontano i risultati provenienti dall'analisi e quelli delle previsioni ad 1, 2, 3 giorni, per quanto riguarda H_s , T_m (T_p è circa il 25% superiore), q_m , oltre alla velocità e direzione del vento. Si vede chiaramente che, almeno per la tempesta del Parsifal (2-3 novembre), le previsioni ad 1 e 2 giorni sono molto prossime all'analisi: l'evento era quindi atteso già dal 31 ottobre, con due giorni di anticipo. La qualità della previsione peggiora al terzo giorno di anticipo. I risultati sono meno buoni per la previsione della seconda tempesta (4 novembre) per la quale le tre previsioni (a 1, 2, 3 giorni) mostrano tutte una altezza d'onda H_s inferiore rispetto a quella risultante dall'analisi. Analoghi risultati sono stati ottenuti negli altri nodi significativi della griglia di calcolo (presso i punti A,M,C).

CONCLUSIONI

Nel seguito si riassumono e si discutono nei loro differenti aspetti, i risultati ottenuti. Poiché il periodo considerato è troppo corto per qualsiasi conclusione definitiva, si preferisce non discutere le modeste differenze tra i tre modelli d'onda, e fissare piuttosto l'attenzione sulla tempesta.

• Ricostruzione.

La ricostruzione è stata eseguita con i campi di vento determinati da due differenti modelli meteorologici come input per tre differenti modelli di moto ondoso. Utilizzando gli stessi campi di vento, i tre modelli d'onda danno risultati simili: ciò indica che il punto chiave nell'analisi della tempesta è la qualità del campo di vento. Questo è particolarmente vero in questo caso a causa della "semplicità" della situazione meteorologica, con un vento unidirezionale piuttosto uniforme che spira dalla costa verso il punto di affondamento del Parsifal.

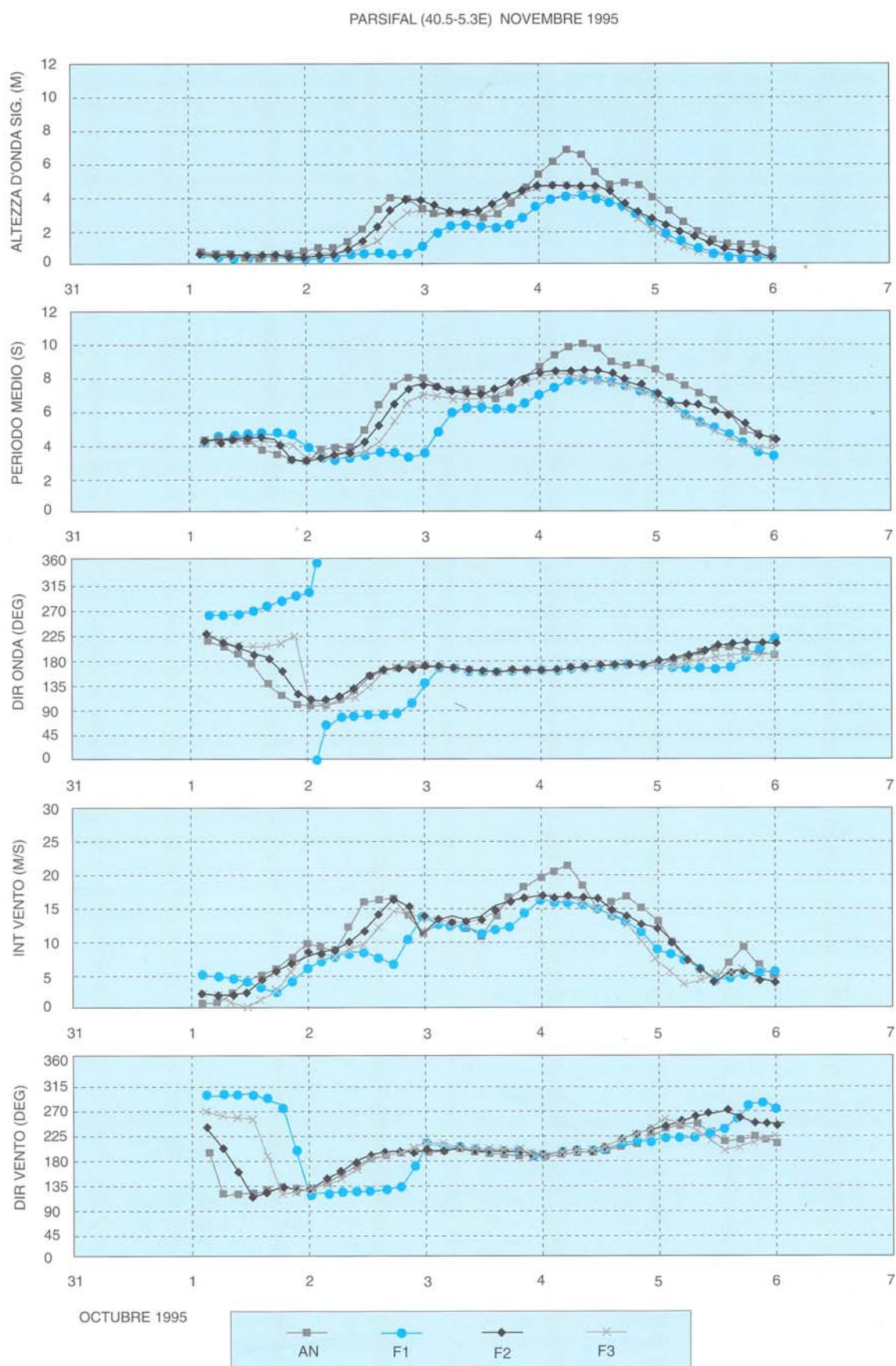


Figura 10: Confronto tra i dati di vento e di onda nel punto Parsifal ottenuti dall'analisi "a posteriori" (AN) e quelli delle previsioni a 1, 2, 3 giorni (F1-F2-F3), applicando i modelli ECMWF/WAM.

Le ricostruzioni dei vari modelli mostrano una altezza significativa inferiore di circa il 30% rispetto ai dati rilevati dalle boe e dal satellite Topex. Pertanto le leggi fisiche che regolano i meccanismi di generazione del moto ondoso suggeriscono un valore della sottostima della velocità media del vento ottenuta con i modelli meteorologici pari a circa il 15-20%. Comunque anche un secondo fattore deve essere considerato. Cavalieri e Burgers (1992) hanno considerato gli effetti della turbolenza dell'aria sui processi di generazione del moto ondoso. Il risultato è una accentuata crescita delle onde, con una conseguente più rapida crescita nella fase iniziale unitamente ad un valore finale maggiore di altezza d'onda. Una varianza del 20-30% della velocità del vento porta ad un incremento di H_s di circa 15-30% rispettivamente. Nel periodo considerato, con l'aria fredda che spirava sopra l'acqua ancora calda del mar Mediterraneo, le condizioni aria-acqua erano molto instabili con una intensa turbolenza. Il problema è che i modelli meteorologici non sono in grado di stimare il livello di turbolenza, che non viene quindi simulato nei modelli d'onda. L'elevata turbolenza del vento di Maestrale e la sua mancata inclusione nelle modellazioni numeriche giustifica parzialmente le sottostime mostrate dalle Figure 8 e 9. Questo potrebbe ridurre l'apparente sottostima della velocità del vento al 10-15%, un valore più coerente con i risultati del paragone con le misure a Mahon riportati in *Tabella 3*.

Considerando i risultati dei modelli d'onda in differenti punti ed i dati misurati disponibili, si è pervenuti ad una stima dell'altezza d'onda significativa di 6.5 - 7.0 m al momento e nel luogo dove il Parsifal è affondato (si noti che la misura di 6.0 m del satellite si riferisce ad una posizione leggermente diversa ed in un istante ritardato di quasi 8 ore). In ogni caso la tempesta del Parsifal non fu eccezionale. Mareggiate di simile intensità si verificano nella zona varie volte nel corso dell'anno. Ad esempio è stato anche riscontrato il passaggio del picco di una nuova più intensa tempesta appena 36 ore dopo l'incidente. L'altezza d'onda significativa H_s con tempo di ritorno di 1 anno nell'area in esame è stimata essere vicino ai 9 m dalle statistiche dei dati da satellite (SOS, 1996), mentre è di 7.5 m al largo di Alghero in base all'analisi delle misure della boa (Franco e Contini, 1997).

• *Previsione.*

Dopo la ricostruzione della tempesta con i venti ottenuti dalle analisi, si è ripetuto il calcolo numerico usando i venti di previsione di ECMWF. I risultati indicano chiaramente che la tempesta era attesa con due giorni di anticipo, con le caratteristiche del mare completamente definite. Un deterioramento delle previsioni appare solo con tre giorni di anticipo. Queste informazioni risultano infatti contenute, anche se con i tipici approssimati termini generali, nei convenzionali bollettini di previsione, disponibili quando il Parsifal lasciò un porto della Liguria il primo novembre.

• *Modelli.*

Anche se la ricerca sui modelli di moto ondoso è ancora attiva, allo stato attuale la qualità dei risultati per un modello d'onda avanzato dipende essenzialmente dai campi di vento in input. In altre parole essa è connessa alla risoluzione spaziale dei modelli meteorologici. Per questa ragione sarebbe stato interessante controllare la qualità della previsione UKMO-LAM. Questo non è stato possibile perché questa previsione non viene archiviata.

In ogni caso le previsioni di vento e di moto ondoso sono oggi disponibili quotidianamente sia presso ECMWF che UKMO. Mentre la loro qualità è elevata in zone oceaniche aperte, una certa sottostima è ancora presente nei bacini chiusi ed in particolare nel Mar Mediterraneo.

Questo è dovuto principalmente alla complessa orografia che caratterizza il bacino ed alla limitata risoluzione dei modelli meteorologici rispetto alla scala delle distanze tra le principali asperità orografiche. Un ulteriore elemento di incertezza è costituito dalla presenza di raffiche di vento nelle tempeste provenienti da nord, in particolare in autunno. Questa particolare turbolenza non è riprodotta negli attuali modelli meteorologici e di moto ondoso. L'effetto è probabilmente più elevato nel Mar Mediterraneo che non in oceano aperto, a causa delle più elevate differenze di temperatura tra aria ed acqua.

• *Accessibilità alle previsioni.*

Anche se con le limitazioni menzionate, una previsione del moto ondoso dettagliata è disponibile quotidianamente nel Mar Mediterraneo anche con 5 giorni di anticipo. Effettuata da ECMWF, la previsione è trasmessa ogni giorno al Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare Italiana a Roma. Da qui, contrariamente alle informazioni meteorologiche, essa è oggi distribuita a seguito di specifico accordo stipulato solo con specifiche istituzioni. In considerazione delle importanti implicazioni, sia dal punto di vista economico che della sicurezza, gli autori sottolineano l'opportunità che si concretizzi un simile accordo da parte di una autorità statale finalizzato ad una capillare distribuzione pubblica in tempo reale di questa utile informazione.

È importante, inoltre, controllare ulteriormente l'attendibilità delle misure da satelliti in bacini limitati chiusi, e ricevere e distribuire in tempo reale sia le misure da satellite che quelle delle boe ondometriche per migliorare le previsioni.

LISTA DEI SIMBOLI

H_s = altezza d'onda significativa

T_p = periodo di picco del moto ondoso

T_m = periodo medio del moto ondoso

q_m = direzione media del moto ondoso

U = velocità del vento (a+10 m sul mare)

RINGRAZIAMENTI

Le elaborazioni con il vento ECMWF sono state parzialmente eseguite presso il centro ECMWF di Reading, U.K.. Si ringrazia il Direttore, dr. Dave Burridge, per la sua cortese disponibilità.

Si ringraziano anche: il SIMN (Roma) per la messa a disposizione delle misure della boa di Alghero, il Puerto del Estado (Spagna) per i dati delle boe spagnole e la Soc.Meteomer (Francia) per i dati del satellite Topex. Una versione preliminare del presente studio è stata pubblicata negli Atti del 4° Congresso AIOM, Padova ottobre 1996.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Cavaleri, L., G.J.H.Burgers (1992) *Wind gustiness and wave growth*, KNMI Afdeling Oceanografisch Onderzoek memo, 00-92-18, De Bilt, 38p.
- Cullen, M.J.P., (1991), *The unified forecast/climate model*, Scientific Paper No. 1, U.K. Meteor. Office, 35 pp.
- Franco, L., P.Contini, (1997) *Wave measurements and climatology in the Italian seas*, PIANC Bulletin n.94.
- Golding, B.(1983) *A wave prediction system for real-time sea state forecasting*, QJR Meteorol. Soc., 109, p.393-416.
- Hasselmann, K., T.P.Barnett, E.Bouws, H.Carlson, D.E.Cartwright, K.Enke, J.A.Ewing, H.Gienapp, D.E.Hasselmann, A.Meerburg, P.Muller, D.J.Olbers, K.Richter, W.Sell and H. Walden, (1973) *Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)*, Dtsch. Hydrogr. Z. Suppl.A, 8(12), 95p.
- Komen, G.J., L.Cavaleri, M.Donelan, K.Hasselmann, S.Hasselmann, P.A.E.M. Janssen, (1994) *Dynamics and Modelling of Ocean Waves*, Cambridge Univ. Press, 532p
- Magnaldi, S, F.Ferrauto, (1996) *Un nuovo modello spettrale di generazione e propagazione del moto ondoso in acqua profonda*, Atti 25 Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Torino, ed.CNR
- Pontes, T. et al. (1996) *WERATLAS: Atlas of the Wave Energy Resource in Europe*. Report to the European Commission, JOULE II Programme, 96p.
- PCM, Programa de Clima Marítimo (1991) *Predicción del oleaje efectuada con el modelo WAM. Análisis estadístico de un mes de predicción (nov. 1988)*. Direccion General de Puertos. Publicacion n.48, pp.102.
- Simmons, A., (1991) *Development of the operational 31-level T213 version of the ECMWF forecast model*, ECMWF Newsletter 56, p.3-13.
- WAMDI Group: S.Hasselmann, K.Hasselmann, E.Bauer, P.A.E.M.Janssen, G.J.Komen, L.Bertotti, P.Lionello, A.Guillaume, V.C.Cardone, J.A.Greenwood, M.Reistad, L.Zambresky, J.A.Ewing, (1988), *The WAM model- a third generation ocean wave prediction model*, J. Phys. Oceanogr., 18, p.1775-1810.