ATTIVITÀ T1.1

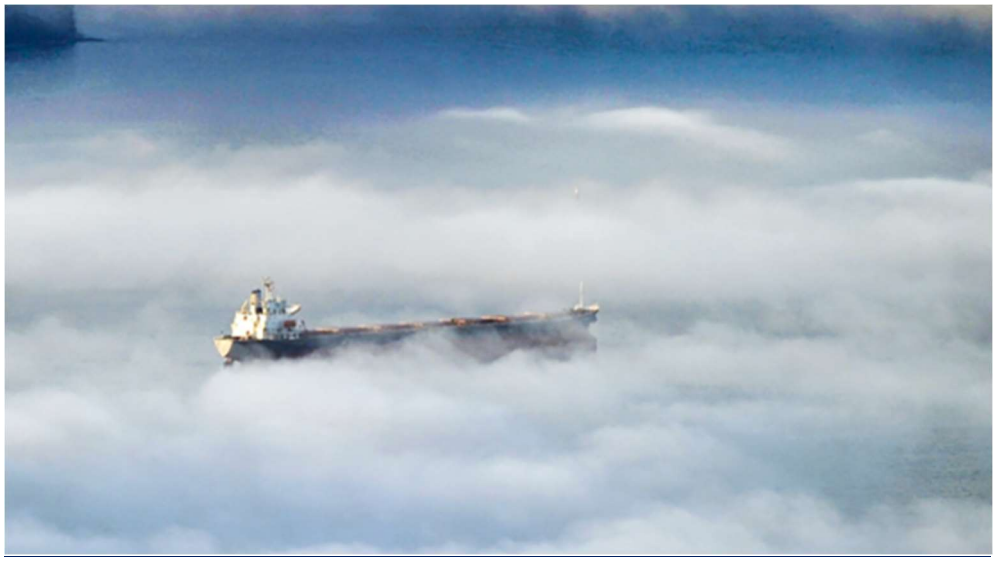
Individuazione di rischi di difficile predicibilità collegati ad azioni atmosferiche e marine

Prodotto T1.1.1

Rapporto di ricognizione sugli strumenti per la valutazione del rischio

Partner responsabile:

Consorzio LaMMA



Questo rapporto è stato redatto da:

Carlo Brandini

Alessio Innocenti

Bartolomeo Doronzo

Angelo Boccacci

Michele Bendoni

Massimo Perna

Valerio Capecchi

Giulio Betti

(Consorzio LaMMA)

Tania Del Giudice

(ARPAL)

PREMESSA

L'obiettivo di questo rapporto è di svolgere una ricognizione dei principali strumenti utilizzati ai fini della individuazione dei rischi di difficile predicibilità per la navigazione, con particolare riferimento ai rischi meteo-dipendenti. Questi strumenti includono osservazioni (tramite strumenti in-situ, radar e osservazioni satellitari) e modelli di calcolo utilizzati sia per lo studio dei fenomeni in tempo reale, sia per studi di fluidodinamica applicata. La disponibilità di questi strumenti è spesso affidata a servizi di previsione meteomarina, alcuni dei quali sono presenti nello spazio di cooperazione e in particolare offerti da enti come ARPAL e il Consorzio LaMMA che sono partner del progetto GIAS.

Prevedere e ridurre i rischi di origine meteorologica e marina.

A livello mondiale, si stima che il 30% degli incidenti avvenga in condizioni meteomarine avverse (Aroucha et al., 2018) ma se si considerano gli incidenti con conseguenze mortali, la percentuali sale al 48% (Weng & Yang, 2015). Per la comprensione dei fenomeni meteorologici e delle loro evoluzione, il ricorso a bollettini e a vari altri tipi di servizi meteorologici è fondamentale perché serve aumentare la conoscenza di come questi aspetti influenzano la dinamica delle imbarcazioni (sia le grandi navi che il diporto) e la loro manovrabilità. Normalmente, la maggior parte delle condizioni meteomarine possono essere previste con un certo anticipo (dell'ordine di 3-5 giorni), è il caso dei sistemi meteorologici associati alle grandi perturbazioni atmosferiche. L'intensità che possono raggiungere questi fenomeni a scala locale può tuttavia essere piuttosto diversa da quella prevista anche se, normalmente, l'affidabilità della previsione aumenta a breve termine, cioè avvicinandosi al momento di cui si vogliono prevedere le condizioni meteo. La tematica legata alla riduzione dell'incertezza nei modelli di previsione dello stato del mare, con particolare riferimento alla ricaduta dei dati previsionali sulla navigazione, è affrontata anche all'interno del progetto strategico SICOMARplus. Normalmente l'incertezza dei modelli di previsione dello stato del mare può essere ridotta attraverso varie metodologie che riguardano l'integrazione tra dati osservati e modelli di previsione, come ad esempio la calibrazione, la validazione o l'assimilazione dei dati.

Aspetto/fenomeno	descrizione	note
SST (Temperatura superficiale del mare)	Alti valori di SST, specie in tarda estate e nella stagione autunnale, sono responsabili del rilascio di grandi quantità di calore latente (evaporazione) in atmosfera che possono contribuire allo sviluppo di piogge particolarmente intense e anche uragani mediterranei	Di per sé la temperatura del mare non costituisce un rischio per la navigazione. Viene rilevata tramite immagini satellitari, sensori in-situ e può essere prevista tramite modelli di previsione oceanici forzati o eventualmente accoppiati con modelli di previsione atmosferica.

Cicloni mediterranei	Cicloni extratropicali mediterranei sono normalmente depressioni caratterizzate dalla presenza di un centro di bassa pressione (< 1000 hPa) e da venti particolarmente intensi. In alcune circostanze possono evolvere in cicloni tropicali mediterranei (detti anche medicane o MEDIterranean hurriCANE "uragano mediterraneo) caratterizzati da un nucleo caldo, convezione temporalesca attorno ad un centro di venti ben definito, piogge torrenziali, forti venti.	Normalmente i Medicane non si sviluppano dell'area del Mediterraneo Nord-Occidentale tra Italia e Francia, ma più probabilmente a sud del Mediterraneo. Tuttavia anche i forti venti che caratterizzano i cicloni extratropicali mediterranei possono essere molto pericolosi anche per le grandi navi.
Pioggia	L'innesco della pioggia è dovuto a diversi meccanismi (scontro tra fronti caldi e freddi, pioggia convettiva, grandi sistemi atmosferici, sollevamento orografico)	La pioggia può essere pericolosa perché riduce la visibilità atmosferica, questo dipende molto dalla dimensione delle gocce, quindi l visibilità è ridotta da 1500 m fino a 500 m
Nubi	Normalmente associate alle condizioni atmosferiche, un'alta concentrazione di nubi può accompagnarsi ad un'elevata instabilità atmosferica che può influenzare lo stato del mare e quindi la navigazione	Cumulonembi sono associati a temporali, pioggia intensa, e raffiche di vento superiori a 30 nodi; cirri pre-frontali indicano l'approssimarsi di condizioni di tempo cattivo.
Nebbia	In mare, normalmente è nebbia da avvezione , che si sviluppa quando la differenza tra SST e temperatura al dew point è > 2°C e con un tasso di umidità > 95%	La nebbia è estremamente rischiosa per la navigazione, specie in prossimità di aree marine pericolose (aree ristrette, porti, stretti ecc.).La nebbia densa è responsabile di circa il 32% di incidenti marini a scala mondiale.
Mareggiate	Le tempeste marine presentano diverse tipologie, a seconda del sistema di circolazione atmosferica che le generano.	Situazioni di mare tempestoso con onde alte sono molto pericolose per la navigazione. Normalmente la previsione del moto ondoso è tra le più

		affidabili nell'ambito dei servizi meteorologici.
Swell	Residuo di mareggiate che si sono verificate in aree limitrofe nelle ore/giorni precedenti	Possono essere pericolose specie se associate a situazioni di mare incrociato (crossing seas)
Trombe d'aria e trombe marine	Si tratta di fenomeni meteorologici altamente distruttivi, ad alta densità energetica, caratterizzati da violenti vortici d'aria a scala locale che si originano alla base di un cumulonembo e quindi associati quasi sempre a temporali estremamente violenti (supercelle).	Le trombe marine sono fenomeni simili alle trombe d'aria, ma di intensità mediamente minore rispetto, che spesso hanno origine da temporali di modesta entità o addirittura da nubi minori rispetto ai cumulonembi. La loro nascita è dovuta a una rotazione dei venti preesistente la cui combinazione con un moto convettivo genera la tromba. In alcuni casi l'intensità del fenomeno può essere considerevole e la tromba marina viene detta tornadica.
Correnti marine	Hanno diversi meccanismi di innesco (vento, maree, interazioni con il moto ondoso, correnti di densità, ecc.) e possono essere associate anche a variazioni del livello del mare.	Normalmente le correnti marine non sono pericolose per la navigazione, ma il loro effetto sulle navi può essere amplificato in prossimità di stretti e in aree marine ristrette e portuali, specie quando le navi riducono la loro velocità.

Uno degli obiettivi di GIAS è di cercare di comprendere meglio situazioni particolarmente difficili da prevedere, e in cui l'elemento esposto al rischio è proprio la nave, l'equipaggio, i passeggeri, le merci che vengono trasportate.
Noi conosciamo vari tipi di situazioni meteorologiche e meteomarine che rendono particolarmente pericolosa la navigazione, infatti molti incidenti in mare, da quando l'uomo ha iniziato a navigare fino ai giorni nostri, sono avvenuti in condizioni di mare tempestoso. A volte questo fattore si combina con la necessità di attraversare alcune aree che hanno una particolare pericolosità, ad esempio gli stretti (Gibilterra, Messina) o nello spazio transfrontaliero, le bocche di Bonifacio. Anche la navigazione costiera può essere pericolosa, specie avvicinandosi alla costa o ai porti, durante mareggiate particolarmente intense.

La previsione di fenomeni intensi come il vento e le mareggiate è normalmente svolta dai centri meteo con una buona affidabilità nel range 48-72 h. Tuttavia ci sono dei rischi la cui predicibilità è molto più complessa. Ad esempio è piuttosto difficile prevedere il formarsi di nebbie in mare che sono fenomeni che si presentano periodicamente anche nel Mediterraneo quando una massa di aria più secca e mite, scorre sopra la superficie più fredda e umida del mare. Il verificarsi di questo fenomeno, che può essere molto pericoloso per la navigazione, molto spesso sfugge alla capacità di rappresentazione dei modelli utilizzati in meteorologia.
Altri esempi riguardano la previsione di fenomeni quali le raffiche di vento improvvise che accompagnano lo sviluppo di celle temporalesche.
È inoltre molto difficile prevedere le trombe marine, colonne d'aria vorticanti che si formano al di sopra del mare, molto simili ai tornado, e che si sviluppano soprattutto nei mari caldi. Si tratta di fenomeni in in aumento nel Mediterraneo proprio a causa del riscaldamento globale.
Un ulteriore esempio è la previsione del moto ondoso. Anche se questa normalmente è piuttosto affidabile, in mare possono verificarsi situazioni che si accompagnano allo sviluppo di onde molto più alte di quelle che i modelli riescono a prevedere. Queste onde vengono spesso nominate nella letteratura internazionale con il termine di onde strane, "freak waves" o giganti "giant waves" o mostruose "rogue waves". In italiano tendiamo a tradurre questi nomi con il termine più neutro di onde "anomale", perchè si tratta in effetti di anomalie rispetto ad alcune distribuzioni tradizionali cioè al concetto di onda significativa (H_s o $H_{1/3}$ o H_{m0}) che assomiglia molto ad una sorta di onda media "percepita" da parte di chi naviga (forse meglio come onda equivalente dal punto di vista energetico). Queste onde non si riescono a prevedere a livello deterministico.

Cosa accomuna tutti questi fenomeni di difficile predicibilità? Proprio il fatto che, essendo molto difficile la previsione da realizzare con modelli deterministici, questa previsione non può essere descritta in termini certi, ma è molto meglio ragionare in termini di probabilità.
Esistono cioè delle situazioni caratteristiche in cui la probabilità di verificarsi di certi eventi è accresciuta. Questo approccio in meteorologia spesso si approccia attraverso una metodologia ad ingredienti, cioè ci sono delle situazioni in cui ci sono tutti gli ingredienti che possono favorire con maggiore probabilità l'insorgenza di nebbia in mare, temporali, trombe marine, o delle stesse onde anomale che si verificano con maggiore probabilità quando le onde hanno determinate caratteristiche.
In generale l'approccio probabilistico, che descrive i fenomeni della natura anche nella loro incertezza, è quello con cui si dovrebbe affrontare qualunque tipo di previsione ma questo avviene a maggior ragione proprio in questi casi in cui la predicibilità è difficile.
Abituarsi a ragionare in termini di probabilità, di accresciuto rischio, è una delle cose a cui dobbiamo ricorrere ogni volta in cui il verificarsi di un certo evento, anche molto pericoloso e dannoso, è tutt'altro che certo, e tuttavia possibile, soprattutto quando il danno (come combinazione di valore esposto e vulnerabilità) è molto alto, perchè in gioco ci sono la perdita di vite umane o i danni arrecati all'ambiente dalla perdita in mare di merci pericolose.

I. INDIVIDUAZIONE DEI RISCHI METEO-DIPENDENTI DI DIFFICILE PREDICIBILITÀ PER LA NAVIGAZIONE

Nel progetto sono stati distinti i fenomeni strettamente meteorologici (ovvero, di fisica dell'atmosfera) da quelli meteomarini ed oceanografici. Il lavoro di riflessione ed analisi svolto in compartecipazione tra LAMMA e ARPAL è finalizzato ala stesura di una procedura comune per la previsione dei rischi naturali di difficile individuazione.

A. Rischi dovuti a situazioni meteorologiche di difficile predicibilità: temporali, raffiche di vento, trombe d'aria.

Esistono diverse situazioni meteorologiche, corrispondenti a diverse configurazioni, potenzialmente pericolose per la navigazione nell'area del mediterraneo nord-occidentale (Golfo del Leone, Golfo Ligure, alto Tirreno, Mar di Corsica). Non necessariamente queste situazioni sono di difficile predicibilità ma, in alcuni casi, sono previste con un buon anticipo (< 24-48 h) e discreta affidabilità.

Una delle situazioni tipiche dell'area, è quella relativa alla formazione di minimi depressionari sul Golfo del Leone e sul Mar Ligure, che normalmente sono previste dai modelli numerici. Il minimo sul Golfo di Genova può essere dovuto allo spostamento del minimo dal Golfo del Leone, e alcune fenomenologie associate, che si verificano a scale spazio-temporali di maggior dettaglio, possono essere più difficili da prevedere. In particolare:

- Nel caso di spostamento del minimo dal golfo del Leone al golfo Ligure l'improvvisa rotazione dei venti a Libeccio può provocare groppi di vento, spesso associati a sistemi multicellulari (squall-line);
- Nel caso in cui il vortice sul Ligure di formi direttamente in loco si assiste ad un progressivo rinforzo dei venti occidentali (Libeccio poi Ponente). Le raffiche possono essere molto intense nel caso in cui il minimo risulti molto profondo e posso acuirsi in presenza di temporali; mareggiate molto probabili.
- La presenza di un minimo profondo sul Ligure si associa a intensi venti di Maestrale sul golfo del Leone e sul Mare di Corsica, tuttavia il rischio di temporali risulta basso a causa dell'ingresso di aria fredda e secca; mareggiate;

Di seguito riportiamo un'analisi di varie configurazioni caratteristiche per l'area, e del grado di predicibilità espresso in una scala da 0 (non predicibile) a 5 (predicibile):

Configurazione	Descrizione	Predicibilità (1-5)

Formazione di un minimo sul golfo del Leone collegato ad una saccatura atlantica.	Generalmente questo tipo di vortice, se profondo, richiama un costante e intenso flusso di venti meridionali (Scirocco/Ostro) su Mar Ligure e alto Tirreno. Il flusso può associarsi, in aria calda a sistemi temporaleschi multicellulari alla meso-scala (vedi definizione dedicata). Il mare risulta formato con ampio fetch e periodo d'onda medio-lungo.	5/5
Formazione di un minimo sul golfo Ligure.	Il vortice può essere il naturale spostamento verso levante del minimo sul golfo del Leone, oppure formarsi in loco per avvezione fredda sulla Francia e avvezione calda sul Tirreno (sottovento a Alpi e Appennino).	4/5
Formazione di un minimo sul medio-basso Tirreno o risalita di un vortice dal Mediterraneo centro meridionale, o sud occidentale.	In entrambi i casi l'area nord occidentale del Mediterraneo risulta interessata da intensi venti di Tramontana e Grecale, caratterizzati da essere particolarmente irregolari nella loro intensità. Le raffiche associate a questi flussi possono essere molto intense e pericolose. Il mare, a largo delle coste, può risultare tempestoso.	3/5
Ciclogenesi esplosiva	In caso di avvezione fredda, con forte gradiente barico e termico tra Europa centrale e Mediterraneo, il vortice può assumere le caratteristiche di	2/5

	"ciclogenesi esplosiva", vale a dire un sistema che si approfondisce molto rapidamente (al ritmo di almeno 1 hPa/ora). In questo caso le raffiche associate possono essere estremamente intense e pericolose; generalmente questi vortici si vanno a centrare sull'Italia centro-meridionale o su Adriatico e Ionio.	
Temporali estivi nell'entroterra.	Durante i mesi estivi, in presenza di intensa convezione, la formazione di forti temporali nell'immediato entroterra può causare improvvise raffiche di vento da outflow e downburst (correnti discensionali molto forti che si distribuiscono a raggiera). Queste, seppur limitate spazialmente, possono essere un rischio per la navigazione nelle zone prossime le coste.	1/5

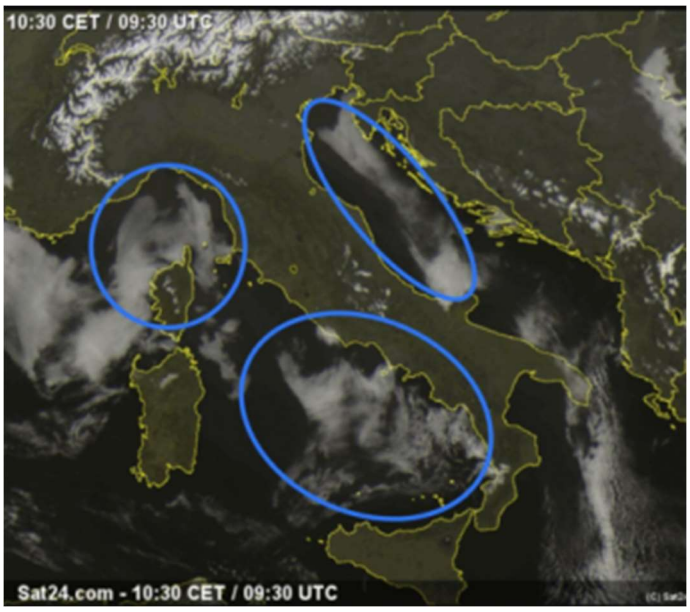
Riguardo ai sistemi temporaleschi multicellulari, ci sono fenomenologie associate che comprendono:

- Trombe marine: impossibili da prevedere in termini spaziali, rappresentano una minaccia per la navigazione (specie per le imbarcazioni più piccole), sebbene il loro raggio d'azione risulti spesso limitato. Si formano quasi sempre in presenza di un fronte freddo o di linee di instabilità (aria fredda in quota).
- MCC: sistemi temporaleschi molto vasti, che si formano in aria calda (flussi di Scirocco, Ostro). Possono essere pericolosi per via delle piogge intense e di improvvise raffiche;
- Squall-Line: particolarmente pericolosa in quanto si associa sempre a intensi venti frontali, solitamente coincide col fronte freddo.

Nebbie da "avvezione" o "da scorrimento"

Spesso verso la fine dell'inverno e inizio della primavera si verificano, in mare, fenomeni di nebbia persistente. Queste non sono da ritenersi un fenomeno eccezionale ma sono certamente fenomeni piuttosto complessi da prevedere. Infatti, tra la fine di febbraio e la prima decade di aprile la temperatura superficiale del Mar Ligure, dell'Adriatico e del Tirreno raggiunge i minimi annuali. In presenza di flussi d'aria molto miti in scorrimento sulla superficie si può assistere alla formazione di nebbie e nubi basse. Un fenomeno favorito quasi sempre dalla presenza di anticicloni di origine subtropicale associati a flussi meridionali.

Quando aria piuttosto secca e mite, in questo caso di origine nord africana, scorre su una superficie più fredda e umida come quella del mare, è costretta a sollevarsi al di sopra dello strato d'aria immediatamente sovrastante l'acqua. La superficie del mare influenza termicamente la parte più bassa della colonna d'aria che risulta, in presenza di alte pressioni, più fredda delle quote immediatamente al di sopra di essa. SI crea così uno strato in inversione che separa una massa d'aria più fredda e umida, il mare in basso, da una più calda e secca, l'aria sovrastante.



Le nebbie da avvezione posso essere molto pericolose per la navigazione e per le operazioni in porto soprattutto perché possono formarsi all'improvviso e avere una distribuzione spaziale e una durata molto irregolari. A differenza delle nebbie da irraggiamento, per lo più circoscritte alle ore notturne e mattutine, le nebbie da scorrimento possono presentarsi a qualsiasi ora del giorno, specialmente in mare aperto.

A livello previsionale il fenomeno presenta molte difficoltà per la forte influenza che hanno le condizioni locali, alla micro-scala, che sono difficilmente parametrizzate ai modelli numerici che simulano le variabili atmosferiche. Da un punto di vista climatologico il fenomeno si presenta più frequentemente nei mesi invernali di gennaio e febbraio, e nella prima parte della primavera (marzo-aprile), ma può occasionalmente essere osservato anche a maggio, giugno e dicembre. Solitamente nei mesi autunnali prevalgono invece le nubi basse. Ci sono poi alcune condizioni favorevoli allo sviluppo di nebbie da avvezione: la presenza di un anticiclone di matrice subtropicale caratterizzato da geopotenziali elevati e accompagnato da un flusso di correnti meridionali molto miti e secche alle quote medio basse (925-850 hPa). Al suolo (1000 hPa), tipicamente, si riscontra assenza di vento o ventilazione debole variabile e alti valori di umidità relativa. Come detto poco sopra, queste condizioni devono presentarsi in determinate fasi dell'anno, cioè quelle con le temperature superficiali del mare più basse. In genere il dissolvimento delle nebbie avviene con la rottura dell'inversione termica a seguito dell'interruzione del flusso d'aria calda superficiale. Evento che corrisponde con l'indebolimento dell'alta pressione e con un aumento della turbolenza (lo strato limite tende ad alzarsi di quota).

Ovviamente non sempre l'osservazione di questi parametri garantisce una previsione corretta, infatti molto dipende anche dalle condizioni locali (micro-scala). Tuttavia, a livello probabilistico, la presenza dei parametri riportati aumenta significativamente la possibilità che il fenomeno si verifichi. Gli stessi limiti che determinano la difficoltà della previsione numerica per le variabili meteorologiche cosiddette "a terra" (ad esempio temperatura a 2 metri e vento a 10 metri d'altezza dal suolo) sono amplificati nel caso della previsione della nebbia marina.

Sono molti i fattori che entrano in gioco nella previsione della nebbia marina, tra gli altri si possono elencare: le condizioni sinottiche, le inversioni termiche, la subsidenza di masse d'aria relativamente più fredde e umide nei bassi strati dell'atmosfera, le circolazioni locali determinate dalle caratteristiche dell'orografia costiera, la turbolenza, la presenza di aerosols e i flussi radiativi a onda lunga e corta.

Questi fenomeni sono per la maggior parte parametrizzati nei modelli operativi di previsione meteorologica ad area limitata, i quali, sebbene utilizzino risoluzioni prossime al chilometro, introducono delle approssimazioni nelle interazioni mare/atmosfera, approssimazioni che sono tanto maggiori nei modelli "uncoupled", dove il modello di mare non fornisce un feedback al modello atmosferico e viceversa. A complicare tali aspetti di difficoltà della previsione, si aggiunge la scarsità di accurate osservazioni circa la visibilità, che sono cruciali per una stima ottimale delle condizioni iniziali.

Immagine inviata dalla Cooperativa Dafne - evento del 1 aprile 2021

B. Rischi dovuti ad azioni marine di difficile predicibilità

Correnti intense

Nel Mediterraneo le correnti marine, tranne rare eccezioni e situazioni quasi assenti nell'area del mediterraneo Nord-occidentale, sono piuttosto deboli (normalmente inferiori a 20-30 cm/s in mare aperto). Situazioni particolari possono riguardare correnti marine in acque basse e aree ristrette. In particolare approssimandosi alle aree portuali, quando le velocità delle imbarcazioni sono basse e le correnti tidali si interagiscono in maniera rilevante con le correnti da vento e di densità, oppure in presenza di mare in tempesta quando la corrente marina superficiale è fortemente influenzata dalle

onde stesse. Di queste situazioni (navigazione in aree portuali) si occupa, in particolare, il progetto SINAPSi finanziato, come GIAS, nell'ambito del programma marittimo Italia-Francia.

Onde anomale

In genere, i servizi di previsione meteo-marina forniti dai centri meteo producono mappe di altezza d'onda significativa che rappresenta "la media del terzo delle onde più alte" o $H_{1/3}$, ovvero una sorta di onda media a livello energetico (talvolta riferita come H_{m0}) che è sicuramente un parametro di importanza fondamentale per la navigazione sia per piccole che per grandi imbarcazioni. Tuttavia, nella realtà è possibile incontrare onde anche molto più alte, seppure con bassa probabilità. La distribuzione delle onde più utilizzata è la cosiddetta distribuzione di Rayleigh (deriva da ipotesi di linearità del moto ondoso e gaussianità della superficie libera), in cui normalmente l'altezza d'onda massima H_{max} corrispondente varia nel range da circa 1,6 a 1,8 volte l'altezza d'onda significativa. Nella letteratura scientifica si tende ad utilizzare come soglia per identificare le onde "anomale" le onde che hanno un'altezza maggiore di 2 volte Hs. Quello che fanno tipicamente i modelli più tradizionalmente usati è di usare delle distribuzioni di probabilità "standard" ricavate in maniera teorica. Tuttavia a seconda delle condizioni del mare si possono avere distribuzioni diverse ed avere quindi, per mari con stessa altezza significativa, una probabilità anche molto diversa di incontrare onde anomale. Pertanto condizioni in apparenza simili possono nella realtà essere associate a livelli di rischio piuttosto diversi.

Queste onde più estreme di una distribuzione, da un punto di vista fisico possono formarsi per vari motivi. Più comunemente si generano per sovrapposizione lineare, ovvero ad esempio onde provenienti da direzioni diverse vengono a focalizzarsi in uno stesso punto dello spazio nello stesso momento generando una singola onda di altezza maggiore, oppure questa sovrapposizione può essere causata da onde con lunghezza d'onda e quindi onde a velocità diverse che "si sorpassano". Tali meccanismi sono presi in considerazione dai modelli tradizionali con i quali è possibile avere una prima approssimazione della frequenza di onde anomale, o sopra una certa soglia. Tuttavia esistono meccanismi più complessi e anche molto più difficili da considerare in un modello. Ad esempio le onde interagiscono con l'ambiente circostante come la batimetria (ovvero la profondità e la morfologia del fondale), le correnti marine e il vento, fenomeni che possono portare le onde a focalizzarsi in uno stesso punto e quindi ad aumentare la propria altezza. Infine le onde interagiscono tra di loro in maniera non-lineare e complessa, e queste interazioni possono a loro volta generare onde di altezza inaspettata.

La predicibilità di questi fenomeni è molto bassa, dato che può essere affrontata solo a livello probabilistico. Gli strumenti utilizzati in GIAS per lo studio di questi fenomeni e per quantificare le relative probabilità saranno presentati nel capitolo relativo alla modellisitica.

II. OSSERVAZIONI

Di seguito viene fornito un quadro dei principali strumenti osservativi a disposizione per l'osservazione meteorologica e marina dei fenomeni descritti nel capitolo precedente.

Una delle fasi più critiche della navigazione è rappresentata dal' avvicinamento, dall'ingresso e dall'uscita dalle aree portuali. I bacini portuali rappresentano un pericolo per le navi, soprattutto quelle di grandi dimensioni, impegnate nelle manovre di accosto ed ormeggio/disormeggio in banchina. Tali operazioni sono rese ancor più critiche in presenza di fenomeni meteo intensi che ne riducono la visibilità e manovrabilità delle imbarcazioni. Dal punto di vista meteorologico particolare attenzione va posta alle fitte nebbie ed alle improvvise raffiche di vento, talvolta correlate a fenomeni atmosferici di difficile predicibilità. Tuttavia, sebbene questi eventi non sempre possano essere facili da prevedere correttamente, un importante supporto a terra può essere dato dalle stazioni meteorologiche, in grado non solo di misurare con elevata precisione i fenomeni in corso ma anche di supportare i meteorologi nelle previsioni a brevissimo termine (nowcasting).

I dati dei sensori di seguito descritti sono presenti nell'area corrispondente allo spazio di cooperazione, ma in gran parte, e soprattutto per alcuni parametri cruciali (vento, visibilità), la densità di questi dati è estremamente bassa. Alcune stazioni meteorologiche complete saranno installate nell'ambito di GIAS.

A. Osservazioni meteorologiche da stazioni a terra

Le stazioni meteorologiche a terra forniscono un quadro completo dell'evoluzione atmosferica in atto, attraverso la rilevazione di svariati parametri ambientali, come la temperatura, la velocità del vento, l'umidità o pressione atmosferica, per citarne alcuni; tali sensori opportunamente interfacciati con un sistema di acquisizione (datalogger) sono in grado elaborare i dati raccolti e trasmetterli in remoto.
Se adeguatamente progettate, le stazioni meteo possono operare in ogni tipo di ambiente.
I principali fattori da tener presente in fase di progettazione in prossimità di porti ed aree marine sono:

- Capacità di operare in assenza di alimentazione elettrica.

Spesso è necessario prevedere un sistema di alimentazione autonomo che in questi casi si basa sull'utilizzo di pannelli fotovoltaici, affiancati da un regolatore di carica e da un gruppo di batterie di capacità adeguata. La potenza elettrica disponibile è comunque limitata e di conseguenza oltre a scegliere sensori a basso consumo è anche necessario regolare accuratamente gli intervalli di acquisizione dei dati.

- Capacità di resistenza ad infiltrazioni e ad esposizione di agenti corrosivi

Essendo l'ambiente marino particolarmente ostile, occorre scegliere un sistema che non solo sia completamente stagno ma anche in grado di resistere alla corrosione, e questo vale non solo per i sensori ma anche per scatole, tubi supporti, cavi, viti, ed ogni cosa che sia esposta all'esterno.

- Assenza di connessione dati

La trasmissione dei dati, di solito, deve avvenire tramite rete cellulare (3G-4G) possibilmente integrato nel datalogger.

- Ambiente non facilmente raggiungibile

Trattandosi di aree spesso difficilmente raggiungibili (come piattaforme, banchine poco accessibili ecc.), la manutenzione deve essere ridotta al minimo ed eventuali controlli sul sistema devono poter essere fatti da remoto. Occorre dimensionare accuratamente tutto il sistema di alimentazione e selezionare sensori privi di parti in movimento, quindi meno soggetti a guasti e malfunzionamenti.
Anche l'architettura del sistema deve essere il più possibile semplificata, l'uso di protocolli di comunicazione digitale permette il collegamento di numerosi sensori riducendo al minimo le operazioni da eseguire durante l'installazione e di velocizzare eventuali interventi di ripristino in caso di danneggiamenti.

Sebbene i fenomeni legati alle nebbie improvvise ed alle raffiche di vento costituiscano il pericolo maggiore per le imbarcazioni e tali informazioni debbano essere trasmesse in near-real time a tutti gli operatori marittimi (e.g. piloti, comandanti, ormeggiatori), un corretto nowcasting si basa sull'osservazione di molteplici parametri meteorologici che devono essere contemporaneamente rilevati. Di seguito elenchiamo i parametri ed i relativi sensori meteo di cui dovrebbe essere dotata una centralina meteo a terra progettata per operare in questo contesto.

Temperatura. Per una misura di temperatura affidabile e precisa sono numerosi gli accorgimenti da adottare per avere una misura affidabile e il più possibile vicina a quella reale, ad esempio la misura può essere influenzata dalla temperatura del supporto a cui è fissato il sensore, dall'irraggiamento solare diretto, o persino dall' autoriscaldamento dell'apparecchiatura stessa. Il sensore installato in questo caso, basato su un sensore NTC (normativa DIN 34760 norma per classificare questi sensori in base alla loro classe di precisione.) inserito in un apposito supporto che consente di proteggerlo sia dalla pioggia che dall'irraggiamento, allo stesso tempo opportuni accorgimenti consentono il ricircolo dell'aria al suo interno per avere una lettura più precisa possibile.
Il sensore ha una precisione di ±0,2° ed una risoluzione di 0,01°.

Umidità relativa. Per la misura dell'umidità viene usato un sensore capacitivo che sfruttando le capacità igroscopiche di un particolare polimero è in grado di rilevare le variazioni di umidità dell'ambiente in cui si trova. la taratura di questo sensore avviene in laboratorio, con un sensore campione.
In condizioni normali questo sensore ha una precisione di circa il 2% ad una temperatura di 20°
Una misura indiretta ricavata a partire dai parametri di temperatura ed umidità è rappresentata dal **punto di rugiada (dew point).** Tipicamente la temperatura di rugiada è indicativa del livello di saturazione dell'aria e può in talune condizioni atmosferiche essere associata a formazione di nebbie e nuvole basse.

Pressione atmosferica. E' misurata tramite un dispositivo MEMS in grado di misurare il peso della colonna d'aria che grava sul sensore in un dato momento. tale valore è influenzato oltre che ovvTamente dall'altitudine anche dalla temperatura e dalle condizioni atmosferiche locali. I sensori devono essere in grado di misurare intervalli di pressione tra 850 e 1050hPa con un'accuratezza di ±0,5hPa.
Sensore di radiazione solare in grado di misurare l'intensità della radiazione solare totale incidente sul sensore grazie ad un elemento semiconduttore sensibile a determinate lunghezze d'onda e grazie all'elettronica di elaborazione presente a bordo del sensore di restituire un valore in W/m2 . Essendo il parametro da misurare fortemente dipendente dall'esposizione del sensore appare ovvio che durante l'installazione vanno accuratamente evitate tutte le posizioni che potrebbero proiettare ombre o essere

fonte di riflessi sul sensore e, altrettanto importante, curare che la finestra del sensore sia in condizioni tali da non sporcarsi o venir ostruita.

Visibilimetro. La visibilità è la massima distanza alla quale un oggetto posto vicino al terreno può essere avvistato. Si tratta di un fenomeno che dipende oltre che dall'osservatore, principalmente dalle condizioni ambientali come ad esempio particelle liquide o solide sospese in atmosfera e dalla loro capacità di assorbire o disperdere la luce.

Il visibilimetro è uno strumento in grado di misurare questo parametro e indicare quanto visibilità sia ridotta a causa di nebbie, piogge, fumi o altri eventi atmosferici. l'utilità di questo parametro ha ovvie implicazioni, in tutti quei luoghi ove per motivi di sicurezza occorre compiere manovre o tenere sotto controllo mezzi in movimento. Trattandosi di un sistema ottico particolarmente delicato in alcune condizioni può essere necessario attivare un sistema anticondensa per riscaldare il gruppo di lenti e altri sistemi per evitare che insetti, acqua e detriti possano impedirne il funzionamento.
La visibilità meteorologica (MOR) è espressa in metri o chilometri (WMO-No.8, chapter 9).
Nel nostro caso il sensore è in grado di definire la visibilità in un campo compreso tra 10 e 2000 metri. Tecniche alternative per la misura della visibilità si basano sull'analisi delle immagini da telecamere fisse (Wauben et al. 2016).

Anemometro sonico. Per caratterizzare il vento viene utilizzato uno strumento chiamato anemometro. Di questi strumenti è possibile trovarne di varie tipologie ma nel nostro caso la scelta di un anemometro privo di parti in movimento è obbligata; avere uno strumento completamente statico lo rende più robusto, preciso, adatto ad ambienti difficili da raggiungere.

La misura della velocità del vento avviene mediante l'uso di 4 trasduttori ad ultrasuoni racchiusi in un unico strumento compatto assieme alla loro elettronica per l'elaborazione delle misure raccolte.
Il vento può essere una grandezza molto complessa da caratterizzare ma le misure che solitamente un anemometro deve fornire sono la velocità media e la direzione sul piano orizzontale. In molti casi è richiesto anche caratterizzare quanto la velocità del vento varia nel tempo, e quali valori massimi raggiunge; un parametro chiamato raffica (wind gust) tiene conto di questa variabilità. la scelta del luogo e della posizione di installazione di un anemometro sono fondamentali visto che l'altezza dal suolo e la presenza di ostacoli possono alterare notevolmente tutte le misure di interesse viste sopra. Alcune specifiche e raccomandazioni minime per l'installazione e le frequenze di acquisizione dati sono fornite dal WMO. In particolare per la misura della raffiche è consigliato campionare il segnale del vento filtrato ogni 0,25 s (frequenza 4 Hz). È possibile utilizzare frequenze di campionamento più basse, ma è necessario rendersi conto che la stima del valore estremo sarà generalmente inferiore (WMO-No.8, chapter 5)

Datalogger

Tutti i sensori sono collegati ad un datalogger il quale ha la funzione di acquisire i dati, elaborarli, memorizzarli e trasmetterli. in alcuni casi la comunicazione è analogica in altri avviene in digitale come SDI-12, un protocollo dedicato alla trasmissione dati a bassissimo consumo energetico, e RS485 un altro sistema di comunicazione dati molto efficiente e resistente alle interferenze.
Alcuni sensori come per esempio quello di temperatura umidità e pressione sono solitamente sensori integrati, a tutto vantaggio della compattezza del sistema.

BIBLIOGRAFIA

World Meteorological Organization. (2008). Guide to meteorological instruments and methods of observation (WMO-No. 8, CIMO Guide). Geneva, Switzerland: Secretariat of the World Meteorological Organization. Chapter 5, 9, pp. 315-336.
Wauben, Wiel, and Martin Roth. (2016) "Exploration of fog detection and visibility estimation from camera images", WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation, CIMO TECO 2016, Madrid, Spain, 1-14.

B. Osservazioni meterologiche da satellite

Il contributo delle osservazioni da remoto sul tema della sicurezza della navigazione comprende la possibilità di monitorare una serie di fenomeni meteorologici in aree ove non siano disponibili sensori in situ. In particolare, la mitigazione degli impatti della nebbia marina può essere facilitata dal rilevamento attraverso osservazioni satellitari. Purtroppo gli approcci tradizionali (sensori passivi) hanno mostrato difficoltà oggettive di distinguere la nebbia da remoto e allo stato dell'arte, tale attività rappresenti tuttora, per la ricerca, una sfida aperta.

Le principali difficoltà nel rilevare la nebbia dai sensori satellitari passivi possono essere riassunte in tre specifici problemi:

1. separare i pixel nuvolosi dai pixel di cielo sereno
2. separare delle nuvole basse dalle nuvole alte
3. separazione della nebbia da dalle nuvole basse

Il primo problema di distinguere la nuvola dal cielo sereno è più semplice durante le ore di luce diurna rispetto alla notte a causa delle differenze di riflettanza nelle bande del visibile. Dato che la riflettanza della superficie dell'oceano è molto bassa, la maggior parte dei tipi di nuvola spicca nelle immagini satellitari con una caratteristica brillantezza.
Bendix, Thies, Nauss e Cermak (2006) forniscono alcuni vincoli sulla gamma prevista di spessore ottico e albedo per la nebbia. Però, dal momento che la maggior parte delle nuvole appaiono caratteristicamente molto luminose, è quasi impossibile nella maggior parte dei casi discriminare obiettivamente tra nuvole alte e basse semplicemente in base alla riflettanza nella parte visibile dello spettro.
Nebbia e nuvole dei bassi strati vengono spesso rilevate valutando la differenza tra la temperatura di brillanza a banda stretta osservata nella finestra di infrarossi a onde lunghe dello spettro (in genere una

lunghezza d'onda compresa tra 10 e 12 μm) e la temperatura di brillanza osservata nell'infrarosso a onde medie (tipicamente nell'intervallo 3–4 μm). Per le nuvole basse e la nebbia, nel canale della finestra a infrarossi a onde lunghe l'emissività è maggiore dell'emissività a infrarossi dell'onda media, portando a un valore negativo la differenza (canale infrarosso a onda media meno canale finestra a onda lunga) dei valori osservati delle temperature di brillanza e tale differenza aumenta con lo spessore delle nuvole (Ellrod, 1995).

Nuvole basse e nebbia possono essere ulteriormente discriminate dalle nuvole alte con l'aiuto di una misurazione della temperatura al suolo. Le nuvole basse come la nebbia hanno temperature al top che raramente più freddo di circa 10° K rispetto alla temperatura al suolo. La temperatura del top delle nubi può essere dedotta dalla temperatura di brillanza del canale della finestra a infrarossi, quindi una grande differenza tra questa temperatura e la la temperatura al suolo indica una nuvola alta.

Discriminare la nebbia da altri tipi di nuvole basse rimane ancora tra le maggiori sfide nel rilevamento della nebbia da remoto. La maggior parte dei tipi di nuvolosità appare chiara nelle immagini visibili e le nuvole basse hanno un top "caldo" con temperature relativamente vicine a quelle della temperatura superficiale. Nessun sensore satellitare passivo riceve informazioni in merito alla quota della base di una nuvola. In assenza di dati di campionamento dettagliati, come è in genere nel caso di eventi di nebbia marina, è difficile distinguere una nebbia con una base presso o sulla superficie del mare da un normale strato di nuvole basse con una base più elevata rispetto alla superficie del mare.

Zhang e Yi (2013) usano una climatologia di temperatura della superficie del mare per discriminare la nebbia dalle nuvole a basso strato sui mari adiacenti alla Cina. Tale lavoro riporta una differenza tra la temperatura del top dello strato di nebbia e del mare differisce tra i casi di nebbia e quelli di nuvola a basso strato. Quindi la climatologia mensile media di SST è utilizzata determinare una soglia dinamica sulla temperatura di brillanza ad infrarossi utile per rilevazione della nebbia.

In Wilcox (2017) vengono utilizzate osservazioni congiunte di firme spettrali di nuvole nel visibile e nell'infrarosso insieme ad acquisizioni di temperatura della superficie del mare (SST) basati su dati satellitari da sensori a microonde. Il lavoro dimostra come altri approcci (Gultepe et al., 2007, Bendix et al. 2006 e Zhang e Yi, 2013) che utilizzano diverse misurazioni della temperatura superficiale per il miglioramento del rilevamento della nebbia possano essere replicati e migliorati usando esclusivamente dati satellitari. I vantaggi di questa tecnica sono che:

(a) si basa solo su dati satellitari localizzati.
(b) può essere applicata sia sottocosta che in aree di mare aperto quasi del tutto prive di campionamenti o dati di temperatura da stazioni.
(c) non si basa su una simulazione numerica del modello meteorologico a elaborazione computazionale.
(d) la nebbia stessa è trasparente alla radiazione microonde utilizzata per il recupero SST fintanto che la nebbia non piove.

Altri studi, (ad es. Wang et al.2019) si focalizzano sulla rilevazione della nebbia ad orari specifici di elevata occorrenza del fenomeno (alba e tramonto). Attraverso l'analisi delle caratteristiche spettrali della nebbia marina all'alba e al tramonto, questo studio determina la legge di variazione della riflettività e della temperatura di brillanza della nebbia marina all'alba e al tramonto, sceglie le fasce di sensibilità, imposta l'indice di rilevazione della nebbia marina e la relativa soglia dinamica, e realizza la rilevazione della nebbia marina all'alba e al tramonto.

I più recenti approcci basati su sensoristica attiva (come in Cermak, 2018) mostrano come strumenti quali il LiDAR possono consentire di mappare la distribuzione e le caratteristiche di nebbia/nuvole basse come ad esempio le variazioni dello spessore dello strato, impossibile da rilevare con sensori passivi.
Altri lavori (ad es. David, 2018) dimostrano il potenziale delle reti di comunicazione a microonde per il rilevamento di nebbia in condizioni difficili in cui i sistemi satellitari sono spesso limitati. Da un lato si sottolinea la capacità di rilevare la nebbia utilizzando collegamenti a microonde commerciali, in un momento in cui il satellite non può rilevare la nebbia a causa della copertura nuvolosa di alto livello che maschera la nebbia a livello del suolo. Dall'altro si evidenzia la capacità del sistema a microonde di escludere la presenza di nebbia a livello del suolo quando il satellite rileva una nuvola di strati a bassa quota, ma non è in grado di identificarlo come adiacente al terreno o ad altitudini più elevate al di sopra di esso. Tali approcci mostrano un notevole potenziale operativo di queste tecniche e verosimilmente verranno in futuro ulteriormente sviluppati.

C. Altre osservazioni

Radar meteorologici

Il radar è uno strumento ad alta tecnologia che fornisce la localizzazione e la stima della precipitazione su una estesa area circolare che circonda il sistema radar e rileva la struttura tridimensionale dei fenomeni meteorologici attraverso la misura della riflettività delle idrometeore (pioggia, neve, ghiaccio) nell'atmosfera, Un suo utilizzo operativo è particolarmente utile nel Nowcasting, soprattutto riguardo all'individuazione di fenomeni violenti (temporali, grandine, wind shear). Il suo principale vantaggio è la possibilità di acquisire dati in tre dimensioni relativi ad aree estese
La conformazione della costa ligure-toscana, la sua posizione rispetto al Mediterraneo e la morfologia del territori retrostanti rendono il tratto di costa particolarmente esposto a fenomeni meteorologici intensi e violenti.
Attività specifiche riguardanti l'utilizzo di radar meteorologici per la sicurezza della navigazione sono previste all'interno del progetto SICOMAplus.

Radar marini

Radar costieri, in varie bande (banda X, HF, VHF, ecc.) sono utilizzati in misura sempre maggiore per il monitoraggio dello stato del mare.
Il principio è quello per cui le onde elettromagnetiche emesse da una (o più di una) antenna trasmittente vengono riflesse dalla superficie del mare e quindi rilevate da una (o più di una) antenna ricevente. La risposta del mare viene misurata e interpretata in base alla conoscenza delle proprietà delle onde e delle correnti marine che causano un 'ritardo' nella risposta noto come effetto doppler.
In banda X le onde elettromagnetiche hanno la stessa lunghezza d'onda delle onde capillari, e il segnale principale di interesse è relativo al moto ondoso. In seconda approssimazione è possibile lavorare al rilevamento della corrente marina di superficie. Il range di questi radar è di 1-4 km.

In banda HF le onde elettromagnetiche hanno lunghezze molto più grandi (fino ad alcuni metri), e il segnale principlae di interesse (parte più energetica dello spettro di risposta) è relativo alle correnti marine misurate nella loro componente radiale). Il range di questi radar dipende dalle frequenze del radar, a 13.5 MHz ad esempio il range arriva a 70-80 km e la risoluzione tipica delle correnti misurate è di 1.5-2 km.

L'attività sui radar marini (sia in termini di investimenti fatti nell'area dello spazio di cooperazione che di prodotti) è sviluppata all'interno del progetto SICOMARplus

III. MODELLI

A. Modelli meteorologici

L'evoluzione spaziale e temporale della velocità, della temperatura e dell'umidità delle masse d'aria, determina il tempo atmosferico che viene generalmente notificato attraverso le previsioni meteorologiche. Il set di equazioni che descrive le trasformazioni atmosferiche è costituito dall'equazione di conservazione della massa, dall'equazione di conservazione della quantità di moto e dall'equazione di conservazione dell'energia
Le equazioni descrivono l'evoluzione temporale e spaziale di diverse grandezze o variabili che, se presenti in forma di derivata temporale, sono dette prognostiche, altrimenti diagnostiche

I centri meteo (come LAMMA e ARPAL) girano modelli meteorologici utilizzando condici come WRF, BOLAM e MOLOCH. Le catene previsionali adotatte da LAMMA e ARPAL sono state validate.

B. Modelli di moto ondoso mediati sulla fase

La generazione e propagazione del moto ondoso, su scale spaziali e temporali che hanno ordini di grandezza rispettivamente superiori al 1-2 km o alle 12-24 ore, sono generalmente descritte da modelli mediati sulla fase. In questi modelli l'equazione di evoluzione è un'equazione di bilancio per l'azione d'onda N, definita come il rapporto tra l'energia dello spettro E e la frequenza relativa σ, che si lega alla frequenza assoluta ω attraverso la dipendenza dal vettore numero d'onda k e dal vettore U che rappresenta la velocità della corrente (se presente). A differenza dell'energia l'azione d'onda si conserva in presenza di correnti
I vari termini rappresentano la variazione temporale, la propagazione spaziale (x,y) e la propagazione intra-spettrale (k, theta). I termini a destra dell'uguale sono i cosiddetti termini sorgente che tengono conto della interazione onda-vento e quindi della generazione, delle interazioni non lineari tra le onde che trasferiscono energia tra le diverse parti dello spettro e fenomeni di dissipazione per whitecapping o frangimento o attrito al fondo.
Diversi schemi numerici sono disponibili per la risoluzione dell'equazione di conservazione dell'azione d'onda e recentemente diversi sforzi sono stati indirizzati al miglioramento della rappresentazione dei termini sorgente.

I centri meteo (come LAMMA e ARPAL) girano modelli di moto ondoso utilizzando codici come WW3, SWAN e MIKE-SW. Le catene previsionali adottate da LAMMA e ARPAL sono state validate.

C. Modelli di moto ondoso non mediati sulla fase

Per modelli di moto ondoso non mediati sulla fase si intende una rappresentazione del fenomeno che sia in grado di descriverne l'evoluzione onda per onda. In genere sono modelli dedicati all'ambiente costiero per cui i fenomeni di diffrazione, rifrazione, shoaling e frangimento e riflessione sono riprodotti dal modello.

Questi modelli sono utilizzati soprattutto per studi di processo o comunque per studi relativi, ad esempio, all'impatto delle mareggiate sulla costa.
LAMMA e ARPAL utilizzando codici come MIKE 21 BW e X-Beach.

D. Modelli idrodinamici

I modelli idrodinamici in ambiente marino sono basati anch'essi sulle equazioni di bilancio della massa, della quantità di moto e dell'energia. In genere, date le caratteristiche dell'ambiente che viene studiato, possono essere assunte come valide delle ipotesi che semplificano significativamente le equazioni.
L'approssimazione di Boussinesq, per cui le variazioni di densità sono piccole rispetto al valore assoluto della densità del fluido, permette di trascurare gli effetti di tali variazioni su tutti i termini delle equazioni di continuità e del moto eccetto che per il termine in cui la densità moltiplica l'accelerazione gravitazionale. In altre parole, il fluido può essere considerato incomprimibile. L'approssimazione idrostatica permette invece di trascurare le accelerazioni verticali rispetto all'accelerazione di gravità ed aiuta a semplificare l'eq. di conservazione della quantità di moto lungo l'asse verticale. Per evitare di dover risolvere fino alle più piccole scale del moto il set di equazioni, si procede a suddividere le variabili in una componente associata al moto medio ed una parte fluttuante (turbolenta). Tale procedura, data la non-linearità delle equazioni di partenza, porta alla derivazione di termini addizionali detti "sforzi di Reynolds", che descrivono la diffusione di quantità di moto nel fluido. Questi termini vengono determinati attraverso opportuni "modelli di chiusura" che permettono di calcolare i valori dei coefficienti di diffusività turbolenta (A, νE, kE).
Attraverso tali approssimazioni si ottiene il seguente set di equazioni alle derivate parziali, chiamate "primitive" in cui le variabili prognostiche sono le velocità u, v, la temperatura T e la salinità S. Le grandezze densità ρ, velocità verticale w e quota del pelo libero η sono dette variabili diagnostiche e si ricavano da equazioni addizionali.
In alcune situazioni, quando la scala del moto in senso orizzontale è molto più ampia di quella in senso verticale, quest'ultima può essere trascurata fino ad ottenere l'approssimazione di "acque basse". Tale approssimazione permette di rimuovere un grado di libertà dal sistema eliminando la variabile w, per cui le velocità orizzontali u e v risultano mediate sulla verticale. In aggiunta, l'equazione di continuità si modifica fino a legare direttamente la divergenza della quantità di moto (intesa come uh dove h è l'altezza della colonna fluida) alla variazione del pelo libero.
Il set di equazioni viene risolto attraverso algoritmi numerici di diversa tipologia, che variano anche in base al rilassamento di alcune delle approssimazioni menzionate in precedenza. In condizioni particolari alcune delle approssimazioni possono infatti essere rimosse, ottenendo così equazioni non idrostatiche. Il maggiore grado di rappresentatività viene però scontato da una maggiore complessità degli algoritmi numerici di risoluzione e da un maggiore tempo di calcolo.
I centri meteo (come LAMMA e ARPAL) girano modelli oceanografici ad area limitata utilizzando codici come ROMS, MIKE-3, MITgcm. Le catene previsionali adottate da LAMMA e ARPAL sono state validate.

E. Modelli e indici per valutare la probabilità di onde estreme

Per ottenere delle stime di tipo probabilistico sulla presenza di onde estreme, da un punto di vista modellistico possono essere adottati diversi metodi in grado di fornire localmente informazioni più dettagliate rispetto ai modelli d'onda a grande e piccola scala forzati da modelli atmosferici (WAM, WWIII, SWAN). Attraverso questi ultimi è possibile individuare le potenziali criticità monitorando i principali osservabili come altezza d'onda significativa, periodo di picco e direzionalità, per poi eseguire un'analisi locale dettagliata.

Un metodo rapido e facilmente accoppiabile ai modelli d'onda è l'utilizzo di indici e indicatori, come l'indice di Benjamin-Feir (BFI) (P.A.E.M. Jansen, 2002), dato dal rapporto tra la pendenza dell'onda e la larghezza di banda spettrale, che pesa quindi la non-linearità rispetto alla dispersione. Valori alti del BFI, prossimi o superiori all'unità, indicano una maggiore probabilità di onde estreme legate al meccanismo di formazione dell'instabilità di Benjamin-Feir (o instabilità modulazionale).

Sono state proposte anche varianti del BFI, come il BFI effettivo (Waseda et al. 2008), che lo estende tenendo conto anche della direzionalità dello spettro.

Il calcolo del BFI applicato a spettri reali richiede la stima di diversi parametri come la larghezza di banda spettrale e la frequenza di picco e può quindi portare a risultati diversi a seconda del metodo di calcolo utilizzato, ma rimane uno strumento utile come indicatore previsionale.

Come indicatori possono essere utilizzati anche osservabili statistici come la skewness e la curtosi dell'elevazione superficiale, in grado di indicare il discostarsi da una distribuzione Gaussiana, che caratterizza invece i modelli lineari. In particolare, la curtosi valuta il peso delle code statistiche e fornisce quindi un'informazione sulla probabilità degli eventi più lontani dalla media. Per il calcolo di questi indicatori statistici è necessario risolvere completamente la forma d'onda attraverso simulazioni dirette e non è sufficiente la sola informazione spettrale.

I modelli per la simulazione diretta non-lineare delle onde sono il metodo più adatto per lo studio di onde estreme, anche se a causa dell'elevato costo in termini di risorse computazionali, possono essere utilizzati soltanto come strumento per fare un'analisi più raffinata localmente.

Questi modelli si basano sull'ipotesi di flusso potenziale, trascurando quindi la viscosità e la rotazionalità del fluido e consistono nel risolvere l'equazione di Laplace per il potenziale all'interno del dominio, corredata da due condizioni al contorno non-lineari per la superficie libera, una dinamica (continuità della pressione) e una cinematica (flusso nullo attraverso la superficie).

Per la risoluzione di questo sistema di equazioni sono stati sviluppati diversi metodi, tra i quali il Boundary Element Method (BEM), che riformula l'equazione di Laplace al contorno, e il metodo High Order Spectral (HOS) proposto nel 1987 separatamente da West et al. e da Dommermuth e Yue.

Il metodo HOS permette di simulare l'evoluzione non-lineare di onde di gravità all'interno di domini periodici, ricorrendo ad una formulazione spettrale basata sulla Fast Fourier Transform (FFT), che garantisce un'alta efficienza computazionale.

In questi modelli di risoluzione diretta in generale non sono presenti forzanti esterne come vento o correnti, ma viene soltanto avanzato temporalmente il campo potenziale partendo da una condizione iniziale data, reale o parametrizzata. Tuttavia, è da menzionare anche la presenza nella letteratura scientifica di modelli di risoluzione diretta con l'aggiunta della forzante del vento (Kharif et al. 2007) e della dissipazione dovuta al frangersi dell'onda (Xiao et al. 2013).

Presso il Consorzio LaMMA viene utilizzato il metodo HOS implementato nel codice open-source HOS-ocean (https://github.com/LHEEA/HOS-ocean) sviluppato all'Ecole Centrale de Nantes. In HOS-ocean la simulazione può essere inizializzata utilizzando una forma d'onda regolare o uno stato di mare irregolare

generato da uno spettro parametrico JONSWAP direzionale o da uno spettro reale output di WWIII, con le fasi generate in maniera random. Tra i parametri numerici deve essere specificato, oltre al numero di modi spettrali (corrispondente alla risoluzione della griglia cartesiana), l'ordine di non linearità con il quale si vuole approssimare il potenziale, calcolato in maniera iterativa.
Tra i parametri fisici devono essere specificati le dimensioni del dominio, la profondità (finita costante, o infinita), il periodo di picco e l'altezza d'onda significativa, oltre ad altre eventuali costanti per la parametrizzazione dello spettro.
Con questo metodo l'obiettivo è quello di valutare la presenza di onde estreme generate in maniera naturale dalle interazioni non lineari, facendo propagare delle realizzazioni del sistema di onde su tempi lunghi.
Una limitazione da tenere presente nei modelli HOS è che essendo l'elevazione superficiale una funzione ad un unico valore, il fenomeno del "wave breaking" non può essere riprodotto. Inoltre da un punto di vista numerico, l'avvicinarsi ad una tale situazione può portare all'arresto della simulazione, dipendentemente anche dalla risoluzione spaziale utilizzata.
Gli output del modello sono il potenziale e l'elevazione superficiale nello spazio fisico e spettrale. Nella Figura 1 si mostra ad esempio uno stato, ad un dato istante temporale, dell'elevazione superficiale nella sua rappresentazione spettrale e fisica.

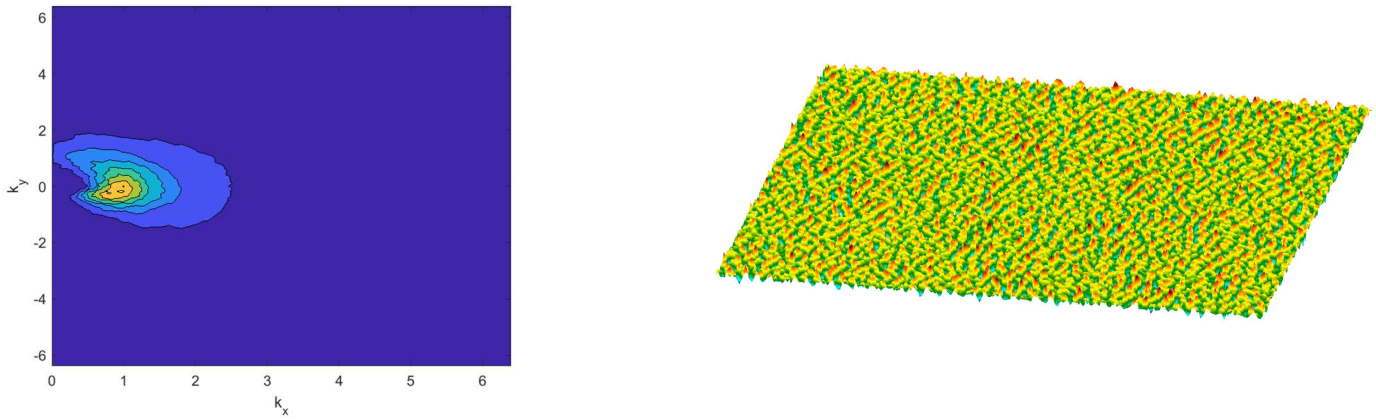


Figura 1: Spettro e corrispondente rappresentazione fisica dell'elevazione superficiale

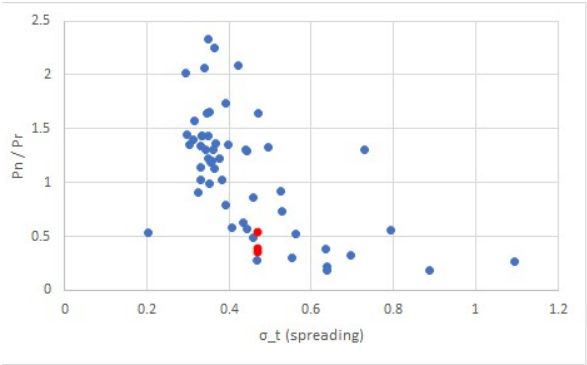
Da un'analisi di queste due grandezze è possibile quantificare in maniera statistica, calcolando la densità di probabilità e altri indicatori statistici, la frequenza di onde estreme. Tuttavia per ottenere delle statistiche robuste è opportuno eseguire più simulazioni per avere diverse realizzazioni dello stesso spettro inizializzato ogni volta con fasi differenti, in modo da poter fare delle medie di insieme.

Allo stesso tempo è anche possibile ottenere informazioni circa la forma geometrica e l'altezza massima delle onde, necessarie a caratterizzarne la tipologia.

L'inserimento di questo tipo di modelli in una ipotetica catena operativa sarebbe di difficile realizzazione dal momento che una singola realizzazione di spettro in un punto geografico ha un costo

computazionale non trascurabile. Diventerebbe quindi irrealistico svolgere delle simulazioni con questo metodo in tempo reale in ogni punto del Mediterraneo e ad ogni istante, reinizializzandole ogni volta con gli output di un modello a grande scala come WWIII.

L'obiettivo è quindi quello di integrare le informazioni ottenute con il metodo HOS in maniera indiretta all'interno della catena operativa, ad esempio ricercando delle correlazioni fra la frequenza di eventi estremi e alcune grandezze medie o parametri calcolabili direttamente dagli spettri, come l'altezza d'onda significativa, lo spreading angolare dello spettro, il BFI, etc. Nella Figura 2 di seguito è riportata la dipendenza di Pn / Pr, ovvero la probabilità di onde con altezza superiore a due volte l'altezza significativa, normalizzata con la stessa probabilità ottenuta dalla distribuzione di Rayleigh (Pr = 3.35 x 10-4). In tali grafici ogni punto rappresenta la probabilità ottenuta da una singola simulazione HOS inizializzata con uno spettro ottenuto da WWIII. Tutti gli spettri sono estratti per lo stesso punto geografico ma in momenti diversi nell'arco di un anno. In particolare la posizione esaminata in questi grafici è quella relativa all'incidente della nave da crociera Louis Majesty avvenuto il 3 Marzo 2010, e i punti in rosso si riferiscono proprio a tale intorno temporale.



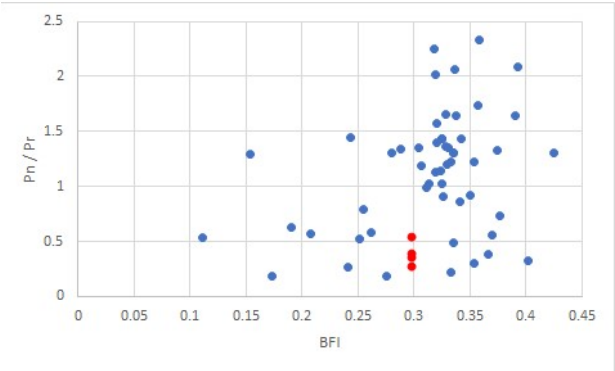


Figura 2: Correlazione tra la probabilità di eventi estremi e lo spreading angolare dello spettro (sinistra) e il BFI (destra).

Già da questa prima analisi, seppur preliminare, si riesce ad apprezzare una dipendenza della frequenza di eventi estremi da questi due parametri. In particolare è interessante vedere come in alcuni casi si abbia una probabilità anche doppia rispetto a quella prevista dalla teoria lineare con la distribuzione di Rayleigh.

A fianco di tale analisi, un raggruppamento degli spettri in clusters definiti da parametri macroscopici o da algoritmi di clustering o machine learning, può aiutare ad individuare la probabilità di onde estreme in una procedura operativa. Con una sufficiente banca dati di casistiche raggruppate in un numero limitato di clusters, sarebbe infatti possibile simulare con il metodo HOS soltanto tali spettri "tipo" a-priori, ed associare in tempo reale ogni punto (spettro) di una simulazione WWIII al corrispettivo cluster, così da estrapolarne le informazioni statistiche di interesse relative agli eventi estremi.

IV. SINTESI

Lo studio di fenomeni meteorologici e meteomarini a bassa predicibilità è fondamentale per poter correttamente affrontare il tema dei rischi meteo-dipendenti ai fini della sicurezza della navigazione.

La maggior parte degli incidenti avvengono in condizioni meteomarine estreme o comunque difficilmente previste dai modelli comunemente utilizzati. Quindi, fenomeni che avvengono con bassa probabilità, ma potenzialmente molto dannosi, e quindi con un rischio risultante tutt'altro che trascurabile.

Nello spazio di cooperazione sono presenti strumenti, come dispositivi di osservazioni e modelli, per lo studio di questi fenomeni e stabilire procedure per migliorare la loro previsione. I partner LAMMA e ARPAL, in particolare, hanno avviato un confronto sistematico di metodi e procedure che saranno descritte nei successivi prodotti della componente T1 del progetto. In particolare, l'attività su cui si focalizzeranno gli studi di GIAS sono

- Lo studio dell'occorrenza delle nebbie da avvezione, e della capacità dei modelli previsionali in uso di prevederle. Questo studio si avvarrà anche della presenza di nuovi dati di osservazione grazie alla rete di osservazione della visibilità di prossima installazione
- Lo studio delle condizioni di occorrenza e delle procedure per la previsione dei temporali e di alcune fenomenologie associate, quali le raffiche di vento e le trombe d'aria
- Lo studio delle condizioni favorevoli allo sviluppo di onde anomale in mare

Ognuno di questi fenomeni viene approcciato a partire dalle previsioni dei modelli a larga scala a cui associare le condizioni favorevoli allo sviluppo dei fenomeni con maggiore probabilità (esempio indici di previsione dei temporali, indici legati alla probabilità di sviluppo di onde anomale, probabilità di sviluppo di nebbie, ecc.)

V. APPENDICE

SISTEMI UTILIZZATI DA ARPAL

ARPAL garantisce il monitoraggio meteoidrologico quantitativo sul territorio regionale, con particolare attenzione al controllo dell'evoluzione dei fenomeni estremi. Il monitoraggio, per necessità legate alla Protezione Civile, avviene in tempo reale attraverso diversi strumenti:

Strumenti di osservazione:

-i dati della rete regionale di rilevamento OMIRL, direttamente gestita dal CFMI-PC;
-i radar meteorologici di Monte Settepani e di Monte Verrugoli;
-i dati acquisiti dal satellite MSG;
-i dati della boa meteo-ondametrica e correntometrica di Capo Mele (SV);
-i dati di fulminazione della rete CESI.

Strumenti di previsione:

- modelli meteorologici Globali
- modelli meteorologici LAM
- Machine Learning (in lavorazione su questo progetto T.1.1..2)

OMIRL

La principale fonte di dati è costituita dalla rete OMIRL, l'Osservatorio Meteo Idrologico regionale. Essa è costituita da circa 200 stazioni meteoidrologiche in telemisura e da una trentina di stazioni meccaniche, residuo delle vecchie stazioni tradizionali ereditate dall'ex Servizio Idrografico nazionale.

Il sito dell'Osservatorio Meteo Idrologico della Regione Liguria (OMIRL) (https://omirl.regione.liguria.it/#/map) permette di consultare, in tempo reale, le osservazioni geo riferite registrate dai sensori al suolo. Permette inoltre di visualizzare le mappe di precipitazione e nuvolosità elaborate da remoto dal radar di Monte Settepani e dal satellite.

Tutte le stazioni sono di proprietà della Regione Liguria e affidate in gestione ad ARPAL in base alla legge regionale n. 20/2006.

Stazioni in telemisura 202 (di cui 16 cae liguria)

- precipitazione 166 (compresa cae liguria 13)
- temperatura 160 (compresa cae liguria 13)
- umidità 80 (compresa cae liguria 1)
- pressione 12
- rad solare 28 (compresa cae liguria 1)
- vento 49 (compresa cae liguria 1)
- idrometri 51 (compresa cae liguria 5)

- neve 12 (compresa cae liguria 1)
- eliofania 3

In Liguria sono attualmente installati due radar: quello in banda C di Monte Settepani (SV) e quello in banda X di Monte Verrugoli (SP) quest'ultima resa possibile grazie al progetto Sicomar Plus. L'utilizzo integrato di questo strumento con altri sensori, come quelli puntuali al suolo o con i satelliti meteorologici, rende possibile una visione più completa delle osservabili meteorologiche contribuendo ad aumentare il livello di sicurezza in mare e a terra.

Le caratteristiche tecniche del radar di Monte Verrugoli sono:

banda di frequenze / bande de fréquences	Banda X (frequenza operativa: 9400-9500MHz)
range	108 km
potenza di picco/ pic puissance	10 kW
risoluzione spaziale / résolution spatiale	450 m
ampiezza del fascio d'antenna / amplitude du faisceau d'antenne	3°
elevazioni/élévations	0.5°, 1°, 1.5°, 2°, 2.5°, 3°, 3.5°, 4°, 4.5°, 5°
risoluzione temporale scansioni / resolution temporelle des scans	15 minuti
misure doppia polarizzazione / mesures à double polarisation	NO
misure Doppler / mesures Doppler	NO

elenco prodotti disponibili / liste des produits disponibles	Volumi di riflettività,
compatibilità con formato ODIM OPERA/ compatibilité avec le format ODIM OPERA	SI – formato BUFR, disponibili i volumi polari

Le caratteristiche tecniche del radar di Monte Settepani sono:

Frequenza operativa	5600-5650 MHz
Potenza di picco	250 kW
Polarizzazione	Orizzontale/Verticale
Ampiezza fascio	< 1 deg
Portata massima	500 Km
Impulsi trasmessi	0.5 / 1.5 / 3 s
Parametri misurati	Riflettività
	Riflettività differenziale
	Velocità radiale doppler

	Varianza della velocità
	Fase differenziale
	Coefficiente di correlazione

Il sistema di monitoraggio meteo-ondametrico del Ponente Ligure

Il Sistema di monitoraggio meteo-ondametrico di Ponente è costituito da:

- Boa meteo-ondametrica principale ormeggiata con propria linea di ancoraggio a largo di Capo Mele (di seguito "boa principale"),
- Boa ondametrica sostitutiva o di back-up (di seguito "boa di back-up"),
- Base Logistica dotata di container di ricovero,
- Linee di trasmissione dati,
- Centro operativo,
- Database,
- Sito web di visualizzazione e richiesta dati sia storici che in tempo reale (da dismettere),
- L'HW e le procedure SW che ne garantiscono il funzionamento

La boa principale misura ogni 30 minuti:

- vento (direzione, intensità, raffica) tramite un sensore anemometrico (Gill WindSonic);
- pressione, umidità, temperatura aria (sensori Vaisala BAROCAP® Digital Barometer PTB330, Vaisala HUMICAP® Humidity and Temperature Probe HMP155);
- onda (altezza significativa e massima, periodo, direzione di provenienza, sensore Oceanor WaveSense);
- corrente (direzione di propagazione e intensità ogni 3,5 metri, dalla profondità di 3,5 a quella di 70 metri, sensore Nortek Aquadopp Profiler);
- temperatura del mare a circa 0,5 metri di profondità (sensore Nortek Aquadopp Profiler).

La boa di back-up misura ogni 30 minuti:

- onda (altezza significativa e massima, periodo, direzione di provenienza);
- corrente (direzione di propagazione e intensità solo in superficie);

I dati della boa:

- in tempo reale sono disponibili in modo gratuito e archiviati on-line sul sito www.arpal.gov.it;

- sono consultabili a partire dalle ore 12:30 UTC del 23/02/2012;
- archiviati e disponibili on-line sul Sistema Informativo Regionale Ambientale della Liguria (SIRAL);
- in tempo reale trasmessi al Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare per l'immissione nella rete internazionale GTS (WMO buoy number 61200);
- sono utili per fini di protezione civile, per la sicurezza alla navigazione e la pesca;
- sono impiegati per la progettazione di opere costiere, per studiare la dinamica delle spiagge, per validare i modelli di previsione di moto ondoso e di corrente.

Le coordinate del punto boa hanno le seguenti caratteristiche:

- Il punto di ancoraggio della boa operativa è ubicato a circa 3 miglia nautiche da Capo Mele (Savona) nel punto di coordinate (basate sul Datum WGS 84):
- latitudine 43°55'05.84" Nord;
- longitudine 08°10'41.99" Est;
- latitudine e longitudine basate su DATUM WGS 84;
- profondità 90 metri circa;
- campo di giro di circa 200 metri intorno al punto boa.

L' Ufficio Circondariale di Alassio della Capitaneria di Porto ha regolamentato la navigazione nei pressi della boa attraverso l'ordinanza N. 13 e N.10 del 2012.

La boa principale:

- è una Fugro Oceanor SEAWATCH Midi 185 Buoy;
- ha l'aspetto di un disco con raggio di 1,85 metri di color giallo;
- ha sopra un castello con 3 piedi a 2 metri sul livello del mare;
- ha riflettori radar passivi e bande catarifrangenti;
- di notte si distingue grazie a una luce gialla lampeggiante (5 lampi ogni 20 secondi).

La boa di back-up:

- è una Fugro Oceanor SEAWATCH Mini II Buoy;
- ha l'aspetto di una quasi sfera con raggio di circa 1,2 metri di color giallo;
- di notte si distingue grazie a una luce gialla lampeggiante (5 lampi ogni 20 secondi).

Proposta di schede stazione

Immagine stazione Boa ARPAL di Capo Mele	Scheda Stazione	
	Codice Stazione	WMO buoy number 61200
	Località	Andora (SV)
	Latitudine	43°55′05.84″ N
	Longitudine	08°10′41.99″ E
	Altezza s.l.m.m. [m]	-
	Tipologia	Boa Ondametrica
	Status del sistema	Operativo
	Parametri meteorologici Osservati	vento (direzione, intensità, raffica) pressione, umidità, temperatura aria
	Parametri oceanografici osservati	onda (altezza significativa e massima, periodo, direzione di provenienza; corrente da 3,5 a 70 m; temperatura sup. mare

	Sensori Installati	Gill Wind Sonic (meteo); Young Marine RM (meteo); Vaisala BAROCAP® Digital Barometer PTB330 (meteo); Vaisala HUMICAP® Humidity and Temperature Probe HMP155 (meteo) Oceanor WaveSense (mare); Nortek Aquadopp Profiler (mare);
	Frequenza di campionamento sensori	1 Hz
	Trasmissione dati	ogni 30 minuti
	Aggiornamento web	ogni 2h
	Motivi del monitoraggio	Monitoraggio meteo - marino
	Frequenza di Manutenzione	> 30 gg
	Formato dei dati acquisiti	ASCII
	Note	

Modellistica numerica

ARPAL gestisce una catena operativa di modelli meteorologici ad alta risoluzione per la previsione numerica del tempo. I modelli utilizzati sono stati sviluppati e vengono aggiornati dall'Istituto ISAC-CNR di Bologna, nell'ambito di un accordo di collaborazione scientifica pluriennale con ARPAL.

La catena modellistica comprende il modello idrostatico BOLAM e il modello non idrostatico MOLOCH, innestato in BOLAM. Le condizioni iniziali e al contorno del BOLAM sono fornite dalle quattro analisi giornaliere (00, 06, 12, 18 UTC) e previsioni del modello globale dell'ECMWF (UE) e consentono di avere run aggiornati ogni 6 ore.

Il modello BOLAM viene innestato a partire direttamente dai campi su livelli ibridi dell'ECMWF. Il dominio di integrazione del BOLAM copre gran parte dell'Europa con una risoluzione di 0.1 gradi, per un totale di 362 x 322 punti griglia su 45 livelli. Il dominio del MOLOCH interessa invece il Nord Italia ad una risoluzione di 0.02 gradi con 206 x 202 punti griglia su 50 livelli verticali. Le integrazioni numeriche sono eseguite su un cluster di PC in ambiente GNU/Linux CentOS: si tratta di 5 host dotati di processore Intel 17-980X 4.20GHz, per un totale di 30 core.

Attualmente la visualizzazione su Firefox non risulta ottimale a causa della mancanza nel browser di una soddisfacente implementazione del rendering delle immagini. Confidiamo di minimizzare il problema in breve tempo.

BIBLIOGRAFIA

Bendix, J., Thies, B., Nauss, T., & Cermak, J. (2006). A feasibility study of daytime fog and low stratus detection with TERRA/AQUA-MODIS over land. Meteorological Applications, 13, 111–125.

Cermak, J. (2018). Fog and Low Cloud Frequency and Properties from Active-Sensor Satellite Data. Remote Sens. 2018, 10, 1209.

David, N. (2018) Utilizing microwave communication data for detecting fog where satellite retrievals are challenged. Nat Hazards 94, 867–882 (2018). https://doi.org/10.1007/s11069-018-3428-3

Ellrod, G. P. (1995). Advances in the detection and analysis of fog at night using GOES multispectral infrared imagery. Weather and Forecasting, 10, 606–619.

Gultepe, I., Pagowski, M., & Reid, J. (2007). A satellite-based fog detection scheme using screen air temperature. Weather and Forecasting, 22, 444–456.

Tian Wang, Yuzhu Liang, Weijia Jia, Muhammad Arif, Anfeng Liu, Mande Xie, (2019). Coupling resource management based on fog computing in smart city systems. Journal of Network and Computer Applications, Volume 135, 2019, Pages 11-19, ISSN 1084-8045, https://doi.org/10.1016/j.jnca.2019.02.021.

Zhang, S., & Yi, L. (2013). A comprehensive dynamic threshold algorithm for daytime sea fog retrieval over the Chinese adjacent seas. Pure and Applied Geophysics, 170, 1931–1944.

Wilcox, Eric M. (2017). Multi-spectral Remote Sensing of Sea Fog with Simultaneous Passive Infrared and Microwave Sensors, in Koracin, D. and Dorman, Clive E., Marine Fog: Challenges and Advancements in Observations, Modeling, and Forecasting. Springer International Publishing 2017. doi:10.1007/978-3-319-45229-6_11.

Heo, Ki-Young & Park, Suhyun & Ha, Kyung-Ja & Shim, Jae-Seol. (2014). Algorithm for sea fog monitoring with the use of information technologies. Meteorological Applications. 21. 10.1002/met.1344.

World Meteorological Organization, (2018) Guide to Instruments and Methods of Observation Volume I – Measurement of Meteorological Variables