

ATTIVITÀ T1.1

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

Prodotto T1.1.2

**Procedura comune per la previsione di rischi naturali
di difficile individuazione: componente atmosferica**

Partner responsabile:

Consorzio LaMMA

data di inizio e di fine:

01/04/2019 – 31/10/2022

Versione finale, 7/12/2022

Questo rapporto è stato redatto da :

Carlo Brandini

Alessio Innocenti

Bartolomeo Doronzo

Giulio Betti

Valerio Capecchi

(Consorzio LaMMA)

Tania Del Giudice

(ARPAL)



Sommario

<i>Introduzione</i>	3
<i>Parte 1</i>	3
Nebbie marine	3
Osservazioni meteorologiche	6
<i>Parte 2</i>	11
Trombe d'aria: ricostruzione numerica nel Comune di Rosignano Marittimo	11
<i>Parte 3</i>	14
Tecniche di machine learning per il nowcasting	14
Implementazione	15
Divulgazione	16
<i>Bibliografia</i>	18



Introduzione

L'obiettivo di questa attività consiste nel fornire degli strumenti per la previsione di eventi meteo-marini di difficile predicibilità legati a fattori principalmente atmosferici. In questo contesto si collocano fenomeni come nebbie marine, trombe d'aria e in generale eventi estremi di tipo convettivo come forti precipitazioni, grandine, down-burst, etc.. In alcuni casi è possibile fornire delle stime previsionali utilizzando indici forniti dai modelli o opportuni sistemi di nowcasting, in altri si è invece costretti ad un approccio di tipo più empirico e deduttivo, data la complessità del sistema fisico. In questo rapporto sono stati raccolti i contributi del Consorzio LaMMA e di ARPAL ed è strutturato come segue:

- Nella prima parte è affrontato il fenomeno delle nebbie marine da un punto di vista fisico corredato di alcuni esempi in cui si sono verificate. Sono poi riportati i dettagli relativi all'installazione di due stazioni meteorologiche acquistate nell'ambito di questa attività del progetto, fondamentali in casi come questo in cui viene utilizzato un approccio basato sull'esperienza e sugli ingredienti;

Nella seconda e nella terza parte sono riportati delle analisi svolte con metodi numerici per la predizione di eventi estremi:

- Nella seconda parte è riportata l'analisi di un caso studio relativo ad alcuni eventi di trombe d'aria avvenuti in Toscana nel comune di Rosignano Marittimo con un modello ad area limitata;
- Nella terza parte infine viene mostrata una metodologia di nowcasting con tecniche di machine learning per la previsione di eventi estremi temporaleschi.

Parte 1

Nebbie marine

La nebbia rappresenta uno dei fenomeni meteorologici più pericolosi per la navigazione, in quanto capace di ridurre fortemente e improvvisamente la visibilità, sia in mare aperto che lungo la costa. In determinate condizioni meteorologiche il fenomeno può persistere anche per più giorni condizionando notevolmente il traffico via nave. Nel bacino del Mediterraneo il fenomeno si presenta più frequentemente quando la temperatura del mare raggiunge i minimi annuali, vale a dire nei mesi di gennaio, febbraio, marzo e aprile; può

occasionalmente essere osservato anche a maggio, giugno e dicembre. Nei mesi autunnali (settembre, ottobre e novembre) la nebbia in mare risulta invece molto rara, mentre più frequenti sono le coperture da nubi basse.

Oltre ad essere un fenomeno pericoloso e di alto impatto, è difficilmente prevedibile, soprattutto in mare e lungo le aree costiere. A differenza delle nebbie su terra, generalmente rientranti nella categoria delle «nebbie da irraggiamento», quelle su mare e costa sono quasi sempre causate da moti avvevativi, sia a scala locale che alla meso scala, le cosiddette “nebbie da avvezione”.

Le condizioni meteorologiche favorevoli alla formazione delle nebbie da avvezione in mare sono note, tuttavia, non sempre queste si verificano (alto impatto-bassa predicibilità). I modelli meteorologici, anche ad alta risoluzione, non sono in grado di restituire, ad oggi, una simulazione attendibile del fenomeno, nonostante i parametri fisici che lo causano siano parametrizzati. Sebbene i modelli ad alta risoluzione utilizzino risoluzioni anche prossime al chilometro, introducono delle approssimazioni nelle interazioni mare/atmosfera; approssimazioni che sono tanto maggiori nei modelli “*uncoupled*”, cioè dove il modello di mare non fornisce un feedback al modello atmosferico e viceversa.

Vista l'incertezza modellistica, ad oggi l'approccio più realistico è di tipo empirico/deduttivo con restituzione probabilistica di accadimento. L'osservazione diretta delle immagini satellitari e l'analisi dei modelli deterministici disponibili (sia ad alta che a bassa risoluzione) relativi ad alcuni casi studio, ha permesso di individuare le precondizioni meteorologiche necessarie che aumentano la probabilità di formazione di nebbie da avvezione in mare.

- presenza di un promontorio anticiclonico di matrice subtropicale africana, caratterizzato da altezze geopotenziali dell'isobara 500 hPa molto elevate per la stagione;
- Flusso di correnti molto miti e secche alle medio-basse quote troposferiche (950/925-850 hPa);
- Al suolo (1000 hPa) assenza di vento, o ventilazione debole variabile e alti valori di umidità relativa;
- Strato di inversione termica tra il suolo e gli strati immediatamente superiori (tra i 1000 hPa e 925-950 hPa);

Descrizione del meccanismo in sintesi.

Quando aria piuttosto secca e mite, spesso di origine nordafricana, 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, infatti, 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. In queste condizioni si viene a creare uno strato in inversione termica che separa uno strato d'aria più fredda e



umida (a contatto con l'acqua), da uno più caldo e secco immediatamente al di sopra di esso.

Immagini di alcuni casi studio recenti (23-24 febbraio 2021, 31 dicembre 2021). Tutti i casi riportati rispettano lo schema generale descritto in precedenza.

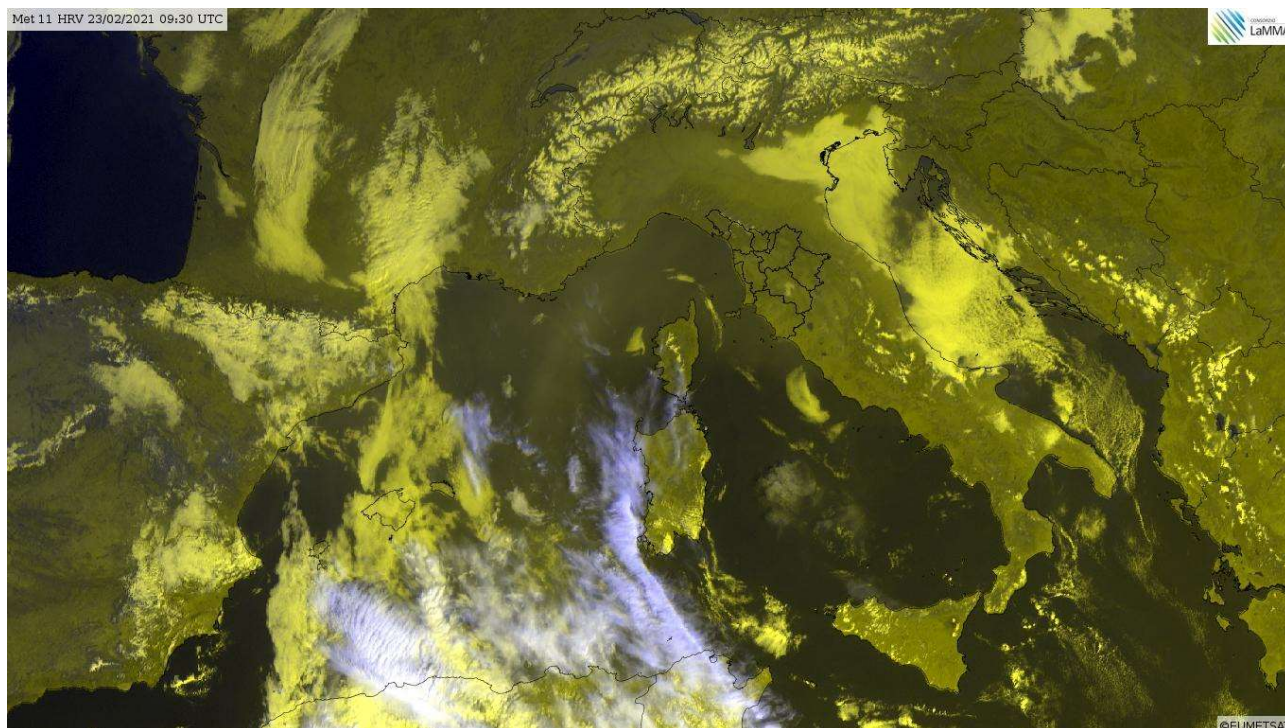


Figura 1 : 23 febbraio 2021. Nebbie da avvezione su gran parte del mare Adriatico.



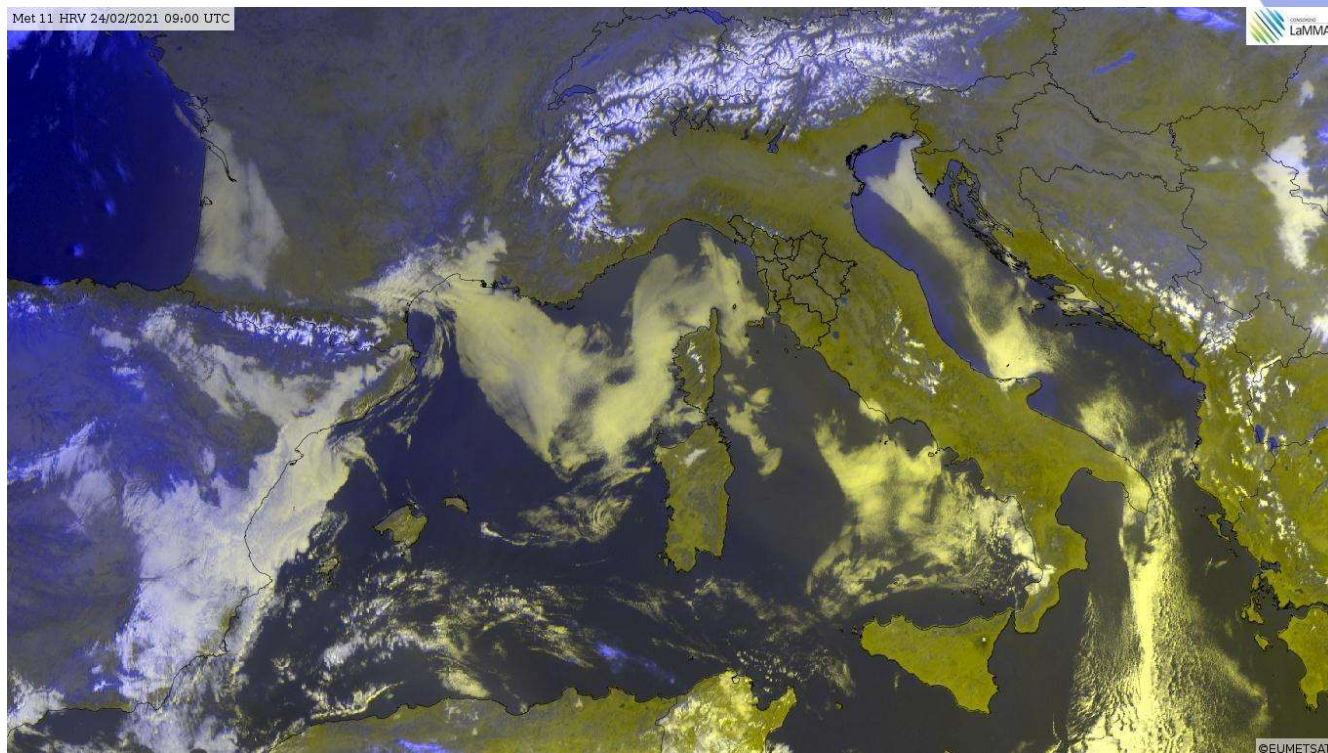


Figura 2 : 24 febbraio 2021. Nebbie da avvezione su gran parte del Mediterraneo Centrale.

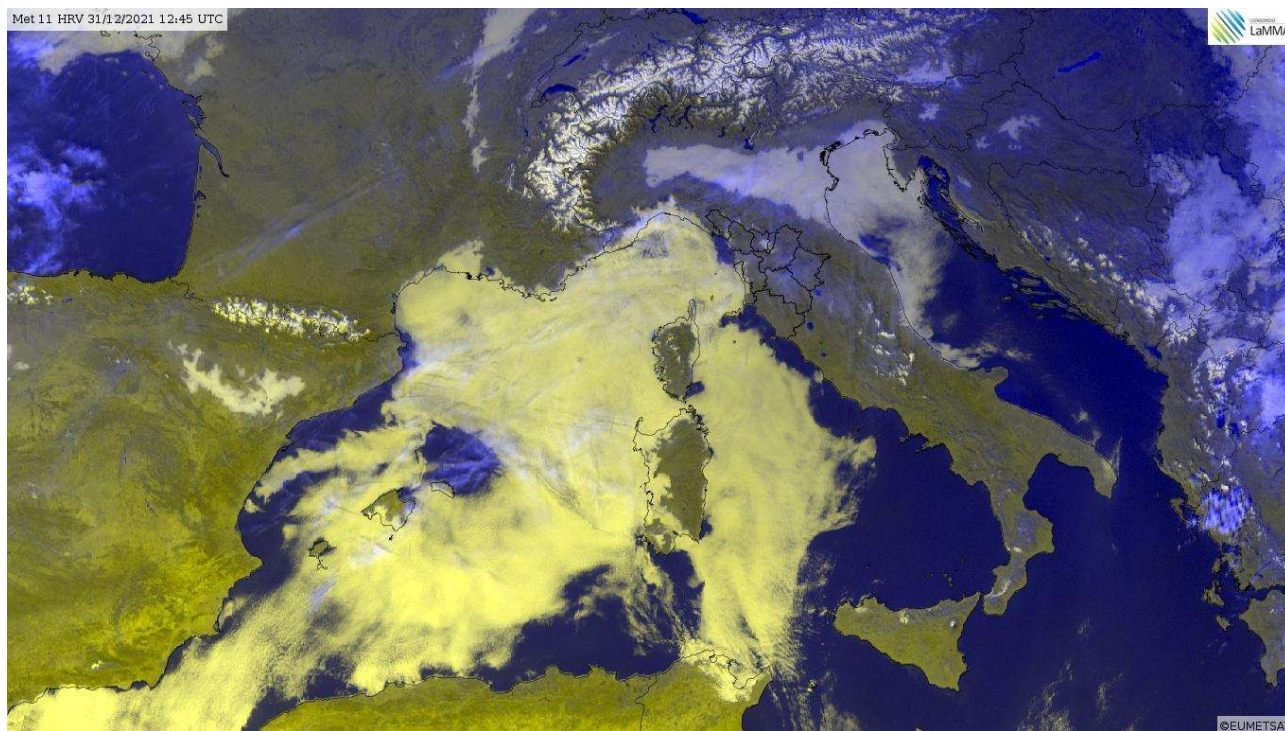


Figura 3 : 31 dicembre 2021. Nebbie da avvezione e nubi basse su gran parte del Mediterraneo centro-occidentale e sull'alto Adriatico.



Osservazioni meteorologiche

Nell'ambito del progetto GIAS, il Consorzio LaMMA ha acquistato due stazioni meteorologiche complete di sensori di visibilità, pioggia, temperatura, umidità, pressione, vento, radiazione solare e webcam, le cui specifiche tecniche sono riportate nel riquadro sottostante (tab.1). Si tratta di due stazioni assemblate con gli stessi sensori meteorologici, ma operanti in due differenti modalità. La prima, attualmente installata presso il pontile SolVada, è collegata alla rete elettrica, ma trasmette i dati in tempo near-realtime, mediante comunicazione wireless GPRS 4G; la seconda è di tipo mobile, completamente autonoma sia elettricamente (l'energia necessaria è fornita da un pannello fotovoltaico) sia dal punto di vista della trasmissione dati (anche in questo caso è dotata di un modem GPRS 4G).

Anemometro sonico	Parametri rilevati: direzione e intensità del vento. Intervallo di campionamento: 1-10 s	
	Direzione vento: Risoluzione: 0.1° Range: 0-359.9° Accuratezza < 3°	Intensità vento: Risoluzione: 0.1 m/s Range: 0-75 m/s accuratezza: < 0.3 m/s +/-5%
Sensore di Visibilità	Campo operativo: 50 - 2000 m Accuratezza: +/- 10% visibilità Principio di misura: 45° (forward scattering)	
Sensore Termolgrometrico	Parametri rilevati: temperatura e umidità relativa dell'aria temperatura di esercizio: -40 ... +80 °C	
	Sensore di Temperatura: Principio di misura: variazione resistenza accuratezza: 0.5 °C risoluzione: 0.1 °C	Sensore di umidità relativa: Principio di misura: capacitivo Range: 0-100% UR Accuratezza: +/- 3% @ 20°C Risoluzione: 0.1 % UR
Sensore di Pressione atmosferica	Principio di misura: variazione di tensione Temperatura di esercizio: -30...+70 °C	

	Range: 850 - 1050 hPa accuratezza: +/- 0.5 hPa @ 22 °C
Pluviometro	Tipologia di sensore: basculante bocca tarata: 400 cm ² Range: 0 ... 300mm/h Accuratezza: < 3% Risoluzione: 0.2 mm
Sensore di Radiazione solare	Tipologia di sensore: cella fotovoltaica o a termopila Range: 0 ... 2000W/m ² Temperatura di esercizio: -20 ... 50 °C
Webcam	Risoluzione minima 1080 p Sensibilità: 0.1 lux Non richiesta illuminazione IR

Tabella 1 : Specifiche dei sensori meteorologici delle stazioni.

Nelle figure seguenti vengono illustrate l'installazione della stazione meteorologica presso il pontile SolVada e la stazione meteo di tipo mobile assemblata presso la sede di Livorno del Consorzio LaMMA.



Figura 4 : Vista generale della struttura presso il pontile SolVada.



Figura 5 : Vista dettagliata di alcuni dei sensori installati (a partire da sinistra): pluviometro, webcam, sensore di radiazione solare, sensori di temperatura e umidità. L'anemometro e il visibilimetro non sono presenti in foto, il sensore di pressione atmosferica è posto all'interno del quadro elettrico.

Alcuni esempi dei dati acquisiti dalla centralina meteo presso il pontile SolVada:

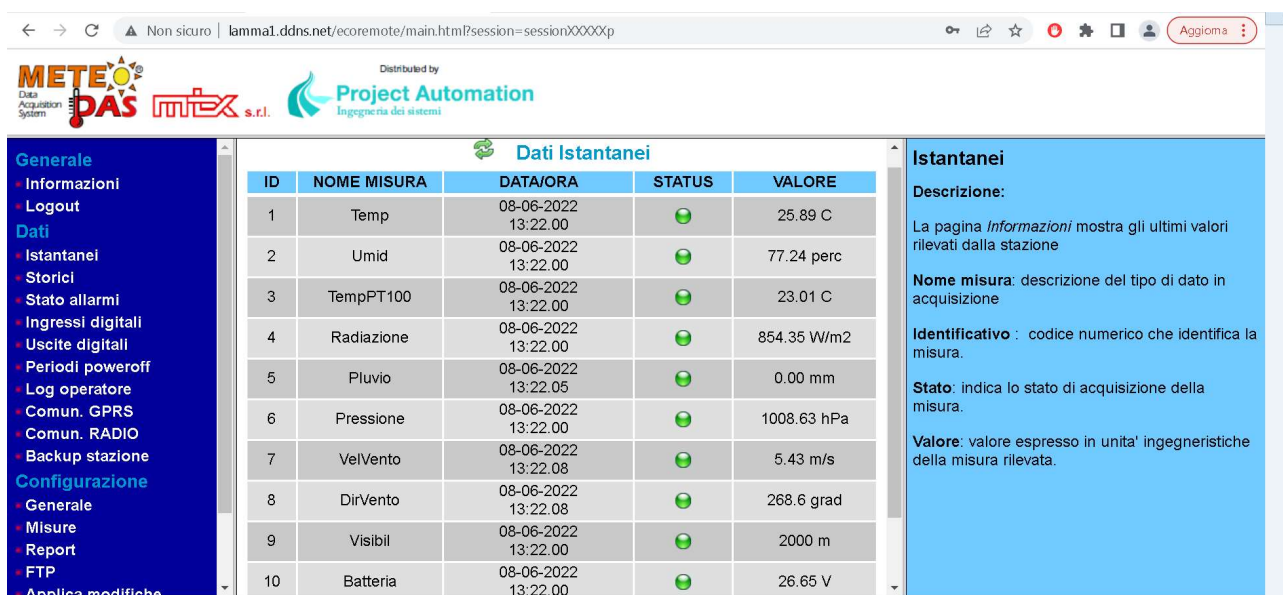


Figura 6 : Istantanea della pagina di controllo del datalogger con visibili i dati letti in tempo reale dai vari sensori.

```

001-08-06-2022113000.txt

1;08-06-2022;113000;26.22;80000000;08-06-2022 112600;26.28;08-06-2022 111900;26.15;0.044294;26.22
2;08-06-2022;113000;73.40;80000000;08-06-2022 111700;75.76;08-06-2022 112100;71.18;1.333420;73.01
3;08-06-2022;113000;23.30;80000000;08-06-2022 112800;23.42;08-06-2022 112900;23.16;0.073946;23.16
4;08-06-2022;113000;844.43;80000000;08-06-2022 112400;913.71;08-06-2022 111600;769.32;43.920300;852.77
5;08-06-2022;113000;0.00;80000000;08-06-2022 112955;0.00;01-01-1970 010000;0.00;0.000000;0.00
6;08-06-2022;113000;1009.15;80000000;08-06-2022 111500;1009.18;08-06-2022
112100;1009.12;0.114429;1009.15
7;08-06-2022;113000;3.21;80000000;08-06-2022 112912;4.03;08-06-2022 111732;2.05;0.404996;3.98
8;08-06-2022;113000;999.0;00000040;01-01-1970 010000;0.0;01-01-1970 010000;0.0;0.000000;0.0
9;08-06-2022;113000;585;80000000;08-06-2022 111700;1364;08-06-2022 112900;296;317.617004;296
10;08-06-2022;113000;26.63;80000000;08-06-2022 112800;26.65;08-06-2022 112900;26.59;0.029722;26.59
  
```

Figura 7 : Il contenuto di uno dei file trasmessi da remoto contenente i dati acquisiti in un intervallo di tempo ed alcuni valori come la media e i valori massimi e minimi della misura.

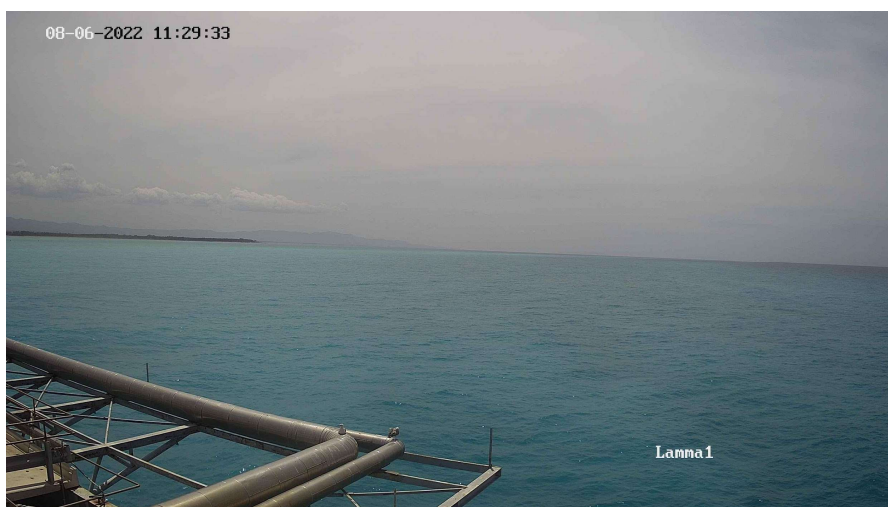


Figura 8 : Una delle foto scattate dalla Webcam dopo l'installazione sul Pontile.



Figura 9 : Stazione mobile assemblata presso il Consorzio LAMMA - Livorno (a sinistra), con dettaglio del sensore pluviometrico (foto centrale), visibilimetro e webcam (a destra), montati sui relativi supporti.



Parte 2

Trombe d'aria: ricostruzione numerica nel Comune di Rosignano Marittimo

La municipalità di Rosignano Marittimo (Toscana, Italia Centrale) nel Novembre del 2020 ha chiesto al Consorzio LaMMA di determinare le ragioni della frequente occorrenza di trombe marine/d'aria che attraversano la sua costa prossima alla frazione di Rosignano Solvay. Infatti, in circa 10 anni, quattro trombe marine hanno interessato quest'area, due delle quali facendo "landfall" hanno danneggiato le stesse case. Solvay Chimica Italia, stabilimento chimico situato a poche centinaia di metri dalla costa di Rosignano Solvay, scarica le sue acque reflue in mare aperto a temperature superiori alla temperatura del mare. La richiesta del Comune è di stabilire se il riscaldamento artificiale dell'acqua di mare prospiciente la costa possa aver favorito, o rafforzato, il verificarsi di eventi meteorologici di così forte impatto.

Per soddisfare questa richiesta, dopo aver analizzato le condizioni meteorologiche alla scala sinottica e alla mesoscala, sono state eseguite alcune simulazioni numeriche con il modello ad area limitata Meso-NH (Lac et al 2018), volte a ricostruire lo scenario alla piccola scala che ha determinato i quattro casi di trombe. Sono stati utilizzati i dati ERA-5 (Hersbach et al, 2020) come condizioni iniziali e al contorno e come dominio di integrazione sono state utilizzate due griglie innestate l'una nell'altra con passo griglia pari a 2,5 km e 500 m, rispettivamente. Per un solo caso di studio (avvenuto il 25 settembre 2020), è stata eseguita anche una simulazione utilizzando un'ulteriore griglia interna, con una spaziatura pari a 100 m. Per questo caso, le simulazioni di sensitività sono state effettuate modificando il valore della temperatura superficiale del mare (SST) nella zona costiera direttamente interessata dal drenaggio delle acque (con un'estensione stimata di circa 10 km²) in due modi: nel primo test è stata aumentata l'SST di 1,5°C rispetto al valore fornito dalle condizioni iniziali (considerando cioè l'effetto del flusso d'acqua dal canale di scolo Solvay in mare aperto) e nel secondo test è stato fissato uniformemente la SST pari a 28,7°C, che è la temperatura media di drenaggio dell'acqua nel mese di settembre 2020 fino al giorno 25 (si veda la Figura 1).

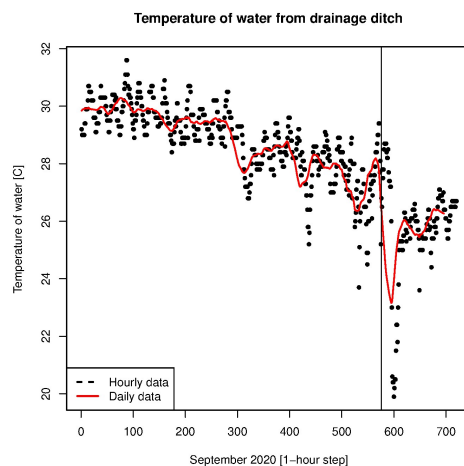


Figura 10 : Temperatura (in °C) dell'acqua dal canale di scolo Solvay nel mese di settembre 2020. I punti neri indicano i valori orari, la linea rossa indica una media mobile di 24 punti. La linea verticale nera indica l'ora del transito della tromba sul territorio di Rosignano Solvay. Dati forniti da Solvay Chimica Italia.

Miglietta e Matsangouras (2018) e Avolio e Miglietta (2022) hanno dimostrato come la costa tirrenica sia un hotspot per le trombe marine nel Mediterraneo, le quali sono più frequenti in autunno e in estate. Poiché le trombe d'acqua non possono essere risolte in modo esplicito nelle simulazioni numeriche, alcuni indici di instabilità vengono utilizzati per diagnosticare condizioni favorevoli al loro verificarsi. Bagaglini et al. (2021) hanno individuato i valori tipici associati al verificarsi di tornado nell'area. I risultati ottenuti con le simulazioni ad alta risoluzione con il modello Meso-NH dimostrano che i valori degli indici di instabilità simulati nei quattro casi di Rosignano Solvay sono superiori a quelli riportati in climatologia (Bagaglini et al. 2021), ciò vale in particolare per Convective Available Potential Energy (CAPE), lo shear del vento nei bassi strati dell'atmosfera, la Storm Relative Helicity nel primo chilometro di atmosfera (SRH1km) (si veda la figura 2 per il caso di settembre 2017).

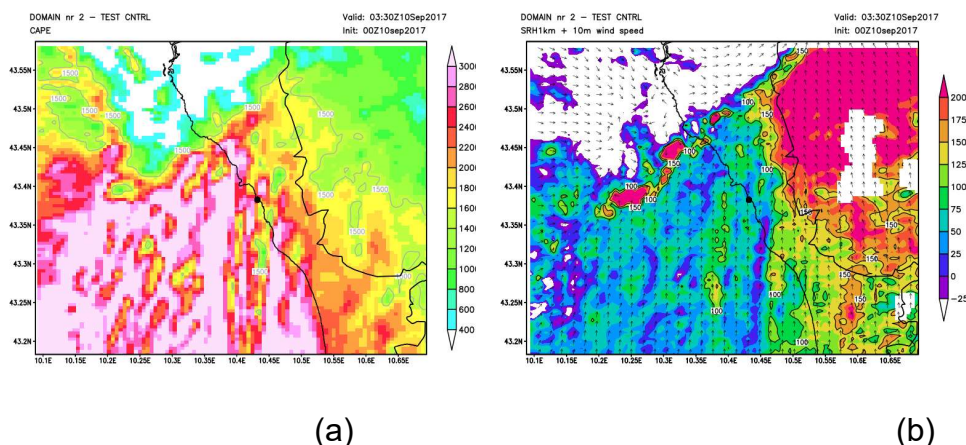


Figura 11 : (a) Energia potenziale disponibile convettiva (CAPE; unità di misura J/kg) e (b) SRH1km (unità di misura m^2/s^2) fornita dalla simulazione del modello Meso-NH (passo griglia 500 m) per la tromba marina osservata nel caso di Settembre 2020. Il punto nero al centro del dominio indica la localizzazione di Rosignano Solvay.

Tuttavia, tali risultati non risentono significativamente dell'aumento delle SSTs nel caso di settembre 2020, per cui con i dati a disposizione e con il set-up impiegato nella ricostruzione delle trombe marine, non possiamo affermare che le acque reflue dello stabilimento Solvay, giocano un ruolo nell'origine e sviluppo delle trombe marine. Nell'analisi dei risultati si evidenzia come la morfologia e l'orografia della costa a cui appartiene Rosignano Solvay siano favorevoli al verificarsi di trombe, generando in alcuni casi linee di convergenza che innescano la convezione. Il ruolo di altre caratteristiche topografiche può essere identificato più chiaramente utilizzando domini più ampi nelle simulazioni numeriche: ad esempio, l'analisi del recente tornado di Civitavecchia (Avolio e Miglietta 2022) indica un ruolo chiave della Corsica nel deviare il flusso e nel determinare una linea di convergenza dei venti al suolo in prossimità del punto in cui si è verificato il tornado. Il fatto che SST più elevati in una piccola porzione di mare prospiciente l'area di studio non influiscano in modo significativo sulle simulazioni è coerente con i risultati per i tornado tirrenici riportati in Bagaglini et al. (2021); nel loro studio, gli autori hanno dedotto che l'origine dei tornado è principalmente correlata a forzanti atmosferiche dinamiche. Permane tuttavia l'incertezza sull'effettiva estensione del mare interessato dal flusso di drenaggio Solvay; allargando l'area in cui è stato modificato l'SST e in futuro dovrebbe essere applicata una valutazione più complessa e realistica del flusso di drenaggio per valutare meglio l'impatto di SSTs più elevate sulle simulazioni numeriche. Per quanto riguarda il set-up numerico, con simulazioni ad altissima risoluzione o con modelli cloud, e utilizzando un approccio LES, si può tentare di simulare direttamente i vortici e studiare l'impatto delle perturbazioni delle SST sulla loro generazione o rinforzo.

Parte 3

Tecniche di machine learning per il nowcasting

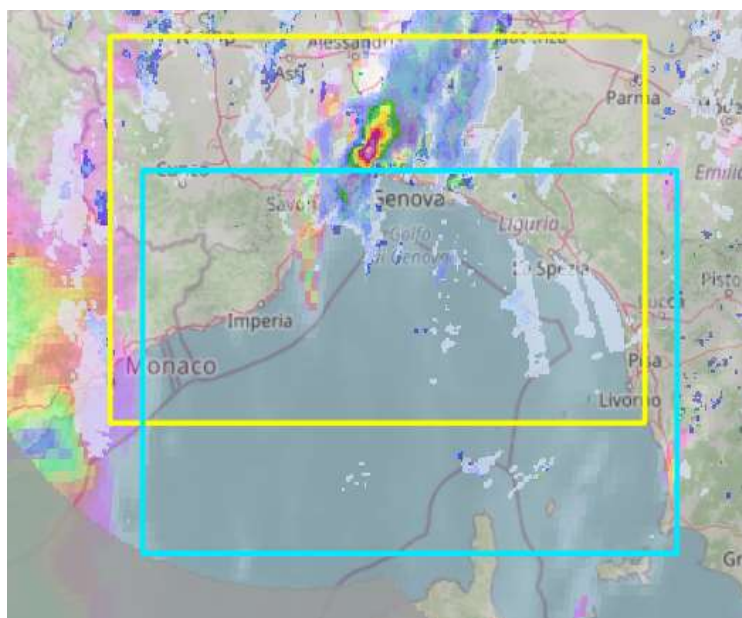
Frutto di una collaborazione tra il CMI di ARPAL e il gruppo MIDA del Dipartimento di Matematica dell'Università di Genova, questa attività si propone di affrontare il problema del *nowcasting* di eventi convettivi di particolare intensità utilizzando tecniche di *machine learning* nell'ottica di individuare situazioni di potenziale rischio per la navigazione dovuto a fenomeni associati (precipitazioni molto forti, grandine, downburst, tornado...).

L'idea alla base è che i dati osservati fino all'istante presente contengano informazioni sulla dinamica delle condizioni meteorologiche locali, da cui si possa estrarre un'indicazione sul potenziale rischio per lo sviluppo di temporali nel brevissimo termine senza far ricorso ai modelli fisici che ne descrivono l'evoluzione generale.

La metodologia impiegata è quella del *deep learning* supervisionato in cui allenamento, ottimizzazione e validazione sono realizzati su uno storico di dati. L'attività ha quindi riguardato l'implementazione di una rete neurale convoluzionale profonda (*deep CNN*) che esamina video di riflettività radar a diversi livelli su un'area di riferimento per alimentare un sistema di allarme binario in grado di segnalare tempestivamente l'occorrenza di eventi temporaleschi particolarmente intensi su tale area nell'ora successiva.

L'obiettivo della previsione perciò non è l'esatta determinazione di posizione e intensità dell'evento (per cui sono state proposte in precedenza CNN volte a fornire immagini radar sintetiche per istanti successivi a l'ultimo della serie temporale di input) ma esclusivamente l'identificazione di finestre temporali ad elevata potenzialità temporalesca.

L'area di riferimento selezionata in questa attività copre gran parte del Mar Ligure (rettangolo ciano in figura).



Implementazione

I dati impiegati nell'implementazione della rete sono campi di riflettività radar, campi di precipitazione stimata e fulminazioni. In particolare i dati di riflettività sono l'input in cui la rete ricerca *feature*, mentre precipitazione e fulminazioni servono a etichettare gli eventi come "molto forti" mediante opportune soglie.

In particolare la rete analizza video di 90' di 3 livelli di riflettività (CAPPI a 2000, 3000 e 5000 m s.l.m.) del mosaico radar nazionale del Dipartimento di Protezione Civile; poiché la cadenza è di 10', si tratta quindi di 3 sequenze di 10 immagini ciascuna.

Gli eventi del *training set* utilizzati per l'ottimizzazione della rete sono etichettati come "molto forti" quando la precipitazione supera i 50 mm/h in almeno 3 pixel contigui nel campo MCM (Modified Conditional Merging) di precipitazione stimata da interpolazione tra radar e pluviometri e quando contestualmente sono presenti almeno 10 fulmini in 10' nei 5 km

circostanti. La soglia di 50 mm/h è coerente con quella di “pioggia molto forte” utilizzata in Liguria, su cui è basato il sistema di allarmi automatici delle centraline della rete di stazioni a terra OMIRL; la richiesta sulle fulminazioni è invece dovuta alla necessità di considerare solo eventi temporaleschi, escludendo piogge particolarmente intense in eventi più di grande scala.

La rete neurale proposta è una rete LRCN (*Lont-term Recurrent Convolutional Network*) che combina una CNN per l'analisi delle immagini “frame by frame” con una rete LSTM (*Long Short-Term Memory*) al fine di estrarre informazioni nello spazio e nel tempo, utilizzando una libreria Keras Python.

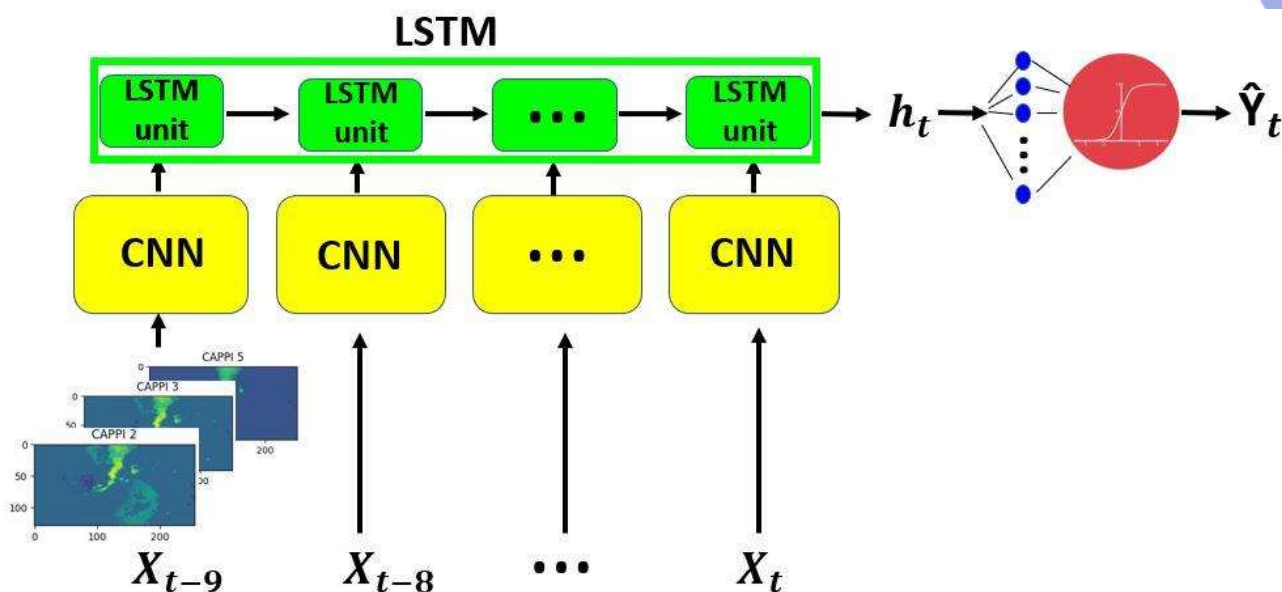
Lo storico di dati di 18 mesi è stato diviso in tre sottoinsiemi:

- insieme di allenamento: 12 mesi (2018/07-2019/06);
- insieme di validazione: 3 mesi (2019/07-2019/10);
- insieme di verifica: 3 mesi (2019/10-2019/12).

Il punto cruciale di questa attività è l'innovativo approccio che tiene conto della distribuzione temporale degli allarmi in grado di promuovere le previsioni che correttamente anticipano l'evento. Tecnicamente questo richiede l'uso di metriche ponderate in base ai valori della previsione nel tempo (per esempio il wTSS) a discapito delle metriche tradizionali (come il TSS) che non distinguono una previsione anticipata da una ritardata. Una metrica ponderata differisce da una tradizionale poiché viene calcolata utilizzando una matrice di confusione ponderata, in cui ai valori FN e FP di falsi negativi e falsi positivi vengono sostituiti i valori wFN e wFP; il peso w viene scelto in modo da enfatizzare da un lato i falsi positivi associati ad allarmi previsti per gli intervalli $2T+1$ privi di eventi osservati, dall'altro i falsi negativi associati a eventi mancati per gli intervalli $2T+1$ privi di allarmi attivati.

I risultati probabilistici della rete vengono infine trasformati in una classificazione binaria utilizzando una tecnica di *ensemble learning*.

I risultati mostrano prestazioni della rete significativamente migliori nel caso in cui sia ottimizzato il wTSS anziché metriche tradizionali.



Divulgazione

- Presentazione di Federico Cassola all'incontro di "coordinamento delle attività relative alla modellistica numerica per le previsioni meteorologiche", 03/02/2022, Roma;
- Presentazione di Federico Benvenuto "Nowcasting di temporali forti mediante ensemble deep learning su immagini CAPPI sull'area ligure", IV Congresso Nazionale di AISAM, 16/2/2022, Milano;
- Presentazione di Antonio Iengo, VIII ISAC Summer Shool, 24/06/2022, Castro Marina [Le]
- Poster presentato da Marco Tizzi "Nowcasting of severe thunderstorms with ensemble deep learning on CAPPI images over Ligurian area in Northern Italy", 11th European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology ERAD2022, Locarno;
- Articolo "Prediction of severe thunderstorm events with ensemble deep learning and radar data", in revisione finale a *Scientific Reports*, preprint <https://www.researchsquare.com/article/rs-1928945/v1>.



Bibliografia

Lac, Christine, et al. "Overview of the Meso-NH model version 5.4 and its applications." *Geoscientific Model Development* 11.5 (2018): 1929-1969.

Hersbach, Hans, et al. "The ERA5 global reanalysis." *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 146.730 (2020): 1999-2049.

Miglietta, Mario Marcello, and Ioannis T. Matsangouras. "An updated "climatology" of tornadoes and waterspouts in Italy." *International Journal of Climatology* 38.9 (2018): 3667-3683.

Avolio, Elenio, and Mario Marcello Miglietta. "Tornadoes in the Tyrrhenian regions of the Italian peninsula: The case study of 28 July 2019." *Atmospheric Research* (2022): 106285.

Bagaglini, Leonardo, Roberto Ingrosso, and Mario Marcello Miglietta. "Synoptic patterns and mesoscale precursors of Italian tornadoes." *Atmospheric Research* 253 (2021): 105503.