

La previsione di SUPERCELLE E TROMBE D'ARIA

La disamina di un evento meteorologico significativo è spesso all'origine di interessanti e più ampie considerazioni, dato il notevole impatto - in termini di danni materiali, feriti e vittime - che questi fenomeni possono causare. Pertanto l'analisi, dal punto di vista osservativo, sinottico e a livello di mesoscala atmosferica, dell'inconsueta sequenza di trombe d'aria che il 19 settembre 2021, in poche ore, ha provocato seri danni su varie aree della Lombardia e dell'Emilia-Romagna, offre utili spunti di riflessione riguardo l'attuale capacità di prevedere le trombe d'aria in Italia e sul possibile sviluppo di apposite reti di allerta.

di Francesco De Martin, Silvio Davolio e Mario Marcello Miglietta

Il termine "tromba d'aria" è storicamente utilizzato nella lingua italiana per identificare vortici a piccola scala. Il termine "tornado" è utilizzato nella letteratura scientifica ed è definito dal Glossary of Meteorology (Hushcke, 1959) come: "una colonna d'aria rapidamente rotante estesa verticalmente dalla superficie alla base di un cumulonembo, normalmente associata a una nube a imbuto e con velocità minima del vento pari a 29 m/s". Attualmente si tendono a usare indistintamente i termini "tromba d'aria" e "tornado", sebbene in passato i due termini siano stati usati con connotazioni differenti

(Miglietta et al., 2018b).

I tornado sono frequenti negli Stati Uniti, dove si verificano mediamente 1223 tornado/anno, ma non di rado si osservano anche in Europa, con una media di 232 tornado/anno (Taszarek et al., 2020).

In Italia invece se ne verificano mediamente 37 ogni anno, con un picco di frequenza sulla pianura veneta, sulla costa tirrenica laziale e sulla costa ionica della Puglia (Miglietta et al., 2018a). L'Italia è uno dei paesi più colpiti da questo fenomeno: ha registrato il più alto numero di danni causati da trombe d'aria in Europa nel

*La tromba d'aria su Carpenedolo
(foto Nicola Pirondini)*

La previsione di supercelle e trombe d'aria

periodo 1950-2015 (318 milioni di euro) ed è il secondo Paese, dopo la Russia, per feriti (753) e vittime (69) nello stesso periodo (Antonescu et al., 2017).

Il nostro Paese è pertanto molto vulnerabile alle trombe d'aria, probabilmente per l'elevata densità abitativa delle zone più frequentemente soggette al fenomeno.

Nonostante la comprovata pericolosità, non esiste attualmente un sistema di previsione dedicato per questo tipo di eventi né in Italia, né in Europa. Negli Stati Uniti, a causa dell'elevato numero di trombe d'aria che colpiscono le Grandi Pianure, è presente dagli anni '50 un efficace sistema di previsione che ne ha diminuito sensibilmente l'impatto in termini di numero di morti e feriti (Doswell III, 2003). È interessante ricordare che negli Stati Uniti fino al 1938 era vietato utilizzare la parola "tornado" nei sistemi di previsione, in quanto si credeva generasse panico nella popolazione. Nel 1948 la Tinker Air Force Base nei pressi di Oklahoma City fu colpita da un tornado e il comandante incaricò i meteorologi della base di studiare l'evento. Appena 5 giorni dopo, gli stessi meteorologi predissero l'arrivo di un nuovo tornado, che effettivamente colpì la base aerea! Il successo di questa previsione diede inizio alla fortunata era delle previsioni



Nella pagina precedente, la scala di probabilità per temporali forti usata per la previsione PRETEMP e, in questa pagina, la tromba d'aria su Roncaro (foto Lucas Adler)



dei tornado nel Nord America (Corfidi, 1999).

In Europa dal 2002 è attivo il progetto ESTOFEX (Brooks et al., 2011) che pubblica bollettini di rischio temporalesco per il continente fornendo il livello di rischio, da 1 (possibili temporali forti) a 3 (probabili temporali molto forti), secondo i criteri indicati nella fig. alla pagina precedente. Antonescu et al. (2020) hanno mostrato che una ipotetica previsione ESTOFEX, emessa per il 24-25 giugno 1967 sulla base dei dati disponibili, avrebbe correttamente previsto lo sviluppo di un'intensa sequenza di trombe d'aria nell'Europa Centrale. ESTOFEX, costituito da un gruppo di meteorologi che conduce questa attività su base volontaria per scopi di ricerca, non è tuttavia un ente istituzionale preposto per l'emissione di allerte. In Italia non esiste un sistema di allerta dedicato per le trombe d'aria anche se, a partire dal lavoro di Miglietta et al. (2016b), la ricerca scientifica sta creando le basi per raggiungere questo obiettivo; si vedano, a titolo di esempio, anche Miglietta et al. (2017 e 2018a), Bagagliani et al. (2021), Avolio et al. (2022).

Inoltre, dal 2015 il gruppo di lavoro PRETEMP, similmente a ESTOFEX, sta testando un sistema di previsione di episodi convettivi severi focalizzato sul territorio italiano. Quest'articolo ha lo scopo di indagare la capacità di prevedere le trombe d'aria in Italia, focalizzandosi su un

caso studio avvenuto il 19 settembre 2021, quando ben 7 trombe d'aria si sono formate sulla Pianura Padana nel giro di poche ore (nella fig. in alto, una delle trombe d'aria che si sono verificate quel giorno a Carpenedolo, BS). Dopo un'iniziale breve presentazione del progetto PRETEMP, l'evento del 19 settembre 2021 è analizzato sia da un punto di vista sinottico che della mesoscala atmosferica. Infine, viene discussa l'affidabilità della previsione PRETEMP pubblicata per quel giorno, da cui seguiranno le osservazioni conclusive.

Il "Progetto PRETEMP"

Il gruppo PRETEMP (PREvisioni TEMPorali, www.pretemp.it) è composto da studenti universitari e meteorologi (fig. alla pag. successiva) che dal 2015 pubblicano quotidianamente un bollettino di rischio temporalesco per l'Italia. Il bollettino di previsione è sperimentale e non rappresenta pertanto un sistema di allerta; esso fornisce invece 4 livelli di rischio, basati sulle diverse soglie di probabilità, che vanno da livello 0 (possibilità di temporali generici) a livello 3 (possibilità di temporali molto forti).

Il progetto è stato ispirato dall'attività di ESTOFEX, ma, essendo incentrato sul territorio italiano, pone maggiormente l'attenzione su fenomeni a piccola scala che, in un territorio dall'orografia complessa come l'Italia, hanno un

La previsione di supercelle e trombe d'aria

ruolo centrale nell'influenzare la dinamica dei temporali. Attualmente PRETEMP è un punto di riferimento per la previsione dei fenomeni convettivi severi in Italia ed è apprezzato, come supporto, dai meteorologi operativi. Oltre all'attività di previsione, dal 2018 PRETEMP coordina la raccolta di segnalazioni di danni dovuti a temporali forti sul territorio italiano nel database "Storm Report", in collaborazione con l'associazione MeteNetwork (www.meteonetwork.it) e numerose altre associazioni locali e singoli appassionati di meteorologia. Dal 2019, tali segnalazioni vengono inoltre automaticamente inviate al database internazionale ESWD (European Severe Weather Database), gestito dall'associazione

ESSL (European Severe Storm Laboratory, www.essl.org). Queste segnalazioni sono utilizzate per molteplici finalità, tra le quali la verifica delle previsioni, le analisi climatiche e la valutazione del rischio da parte di aziende private di assicurazione.

L'evento del 19 settembre 2021: le osservazioni al suolo

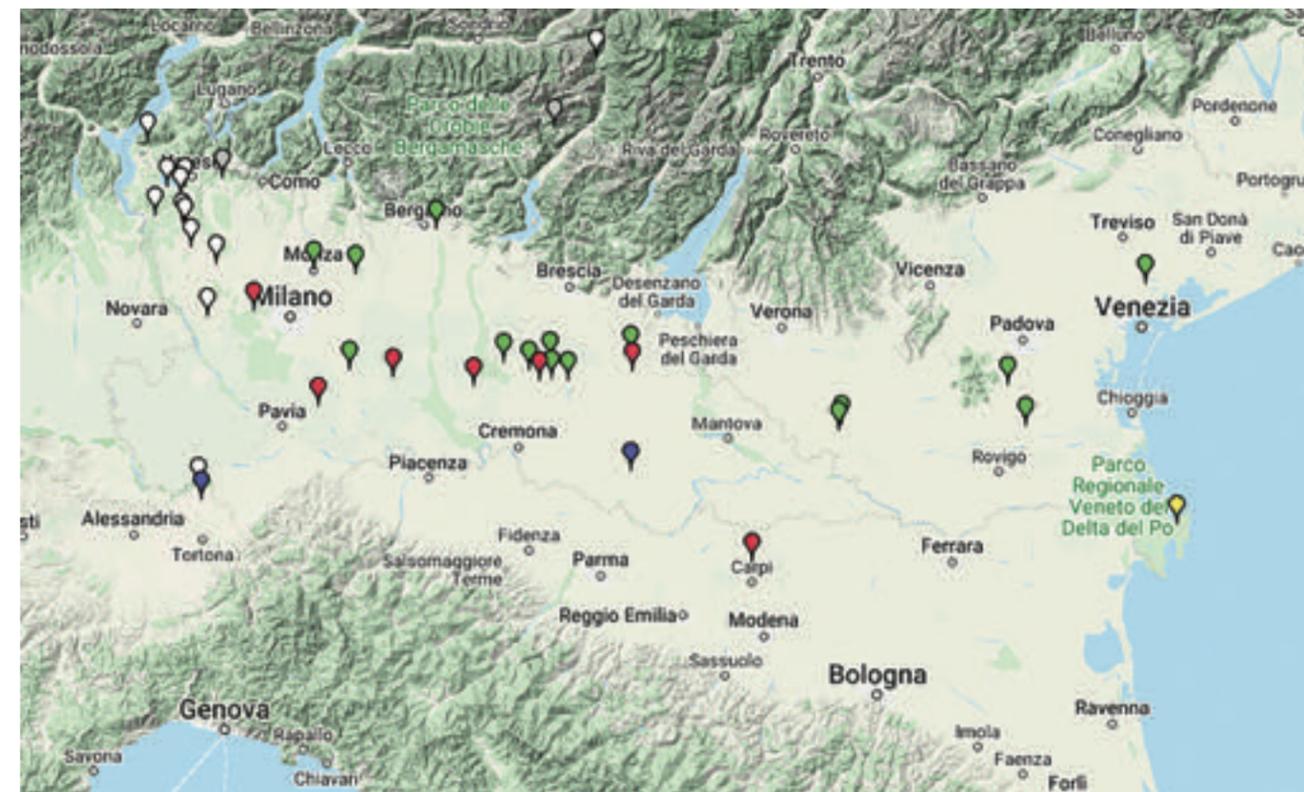
Nelle prime ore del 19 settembre 2021 un sistema convettivo alla mesoscala ha causato precipitazioni intense nella zona dei laghi lombardi (fig. alla pag. successiva). In seguito, l'attività convettiva si è estesa alla pianura lombarda, inizialmente organizzandosi come un sistema lineare

mentre, dopo le 12.00 UTC, si sono formati alcuni temporali a supercella. Infine, in serata, il sistema convettivo si è spostato sul Veneto, indebolendosi progressivamente. Le trombe d'aria (tabella in basso) si sono formate lungo una fascia di territorio poco a nord del Po sulla pianura lombarda: tre trombe d'aria a Soresina (CR), Pontevecchio (BS) e Carpenedolo (BS) sono state generate da una stessa supercella, che ha percorso circa 150 km tra Lombardia e Veneto. A Carpi, nel modenese, si è generata un'altra tromba d'aria che ha colpito il locale aeroporto. Nel complesso ben 4 trombe d'aria sono risultate di grado F2 nella scala Fujita. Un'analisi dettagliata dei danni causati da questa sequenza di

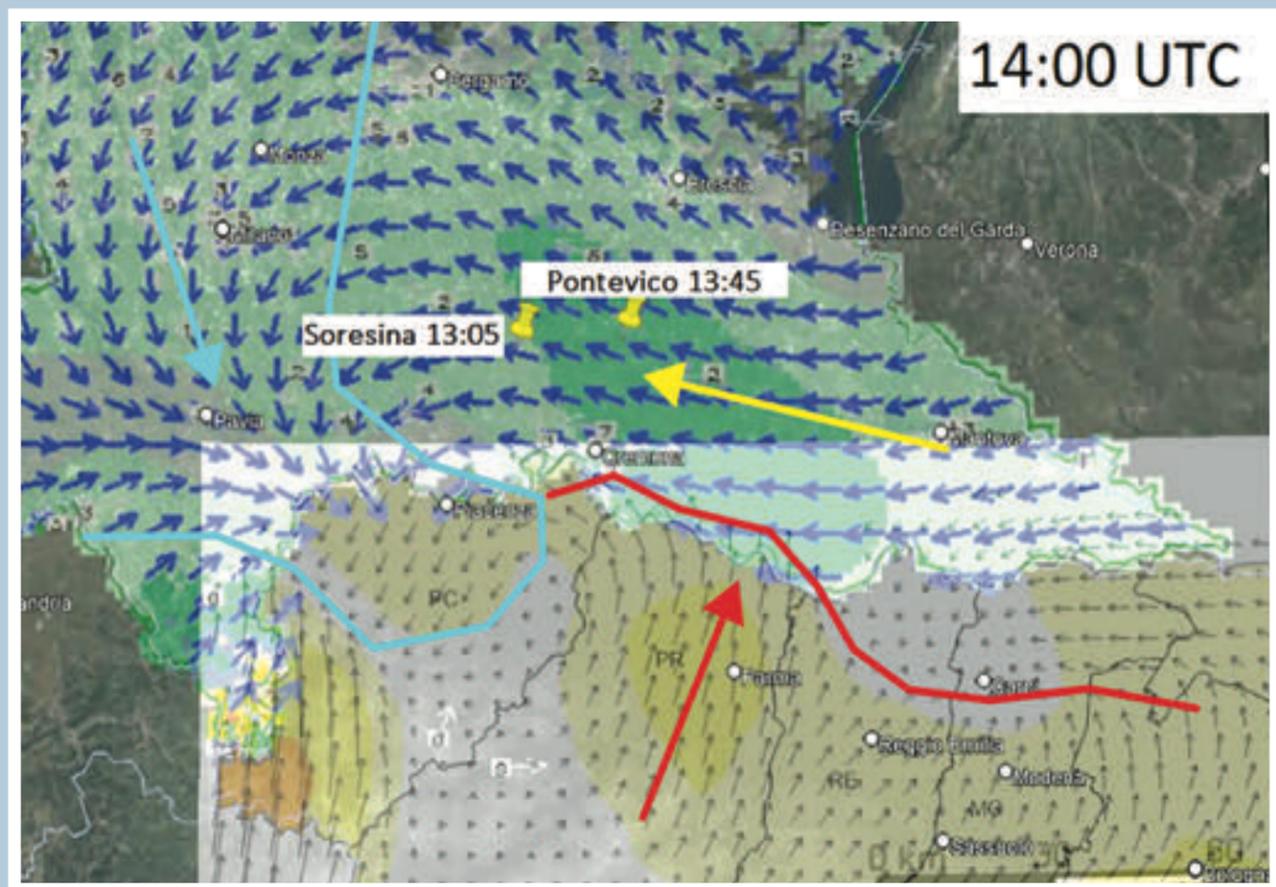
trombe d'aria può essere trovata in Pavan (2022). Dall'analisi delle osservazioni al suolo, fornite da ARPA Lombardia e ARPA Emilia-Romagna, è stato individuato un "punto triplo" (Maddox et al., 1980), ossia un punto in cui interagivano tre masse d'aria di natura molto diversa (fig. alla pag. successiva): una massa d'aria fredda da nord, associata al fronte che ha scavalcato le Alpi; una massa di aria calda e secca da sud-ovest, proveniente dal Mar Ligure e in discesa dall'Appennino settentrionale; una terza massa d'aria calda e umida, estesa dal Mar Adriatico alla pianura lombarda. Si nota che tutte le trombe d'aria si sono formate in prossimità del punto triplo.



Alcuni componenti del gruppo PRETEMP e, nella pagina successiva, l'elenco e la mappa degli eventi tornadici del 19 settembre 2021 descritti dall'articolo



Località colpita	Ora (UTC)	Classificazione	Percorso (km)
Roncaro (PV)	1115	F1	2.8
Corte Palasio (LO)	1215	F2	2.2
Settimo Milanese (MI)	1235	F0	0.4
Soresina (CR)	1305	F1	3.3
Pontevecchio (BS)	1345	F2	6.2
Carpenedolo (BS)	1450	F2	7.1
Carpi (MO)	1500	F2	4,7



Analisi sinottica

Secondo quanto indicato nelle mappe alla pag. successiva, a scala sinottica l'origine dell'evento è caratterizzato da un profondo "cut-off" entrato dalla Francia che, associato ad una massa d'aria fredda in quota, ha attraversato da ovest a est tutta la Pianura Padana (fig. in alto a sin.), unita ad un'intensa anomalia di Vorticità Potenziale (fig. in alto a destra) e ad un ramo del getto polare che, in transito tra Francia Meridionale e Mar Ligure, causava forte divergenza in alta troposfera sul Nord Italia (fig. in basso a sin.).

Inoltre, al suolo era presente un minimo di pressione (fig. in basso a destra, sempre alla pag. successiva) spostatosi dal Piemonte al Mar Adriatico nel corso della giornata. La situazione sinottica risultava quindi favorevole allo sviluppo di temporali forti sul Nord Italia, anche se questo non forniva evidenze sufficienti per identificare un'alta probabilità di sviluppo di tornado.

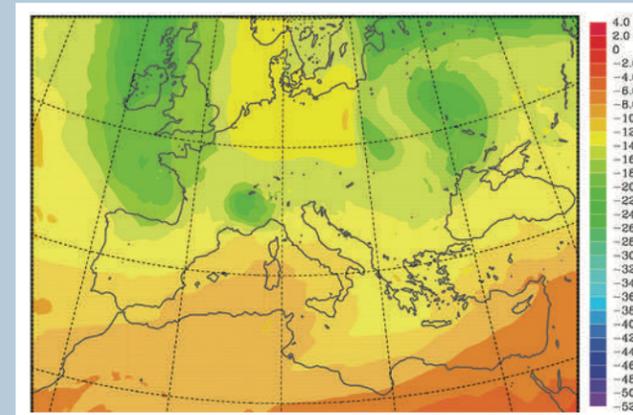
Analisi alla mesoscala

Passiamo adesso a schematizzare la dinamica alla meso-

scala dell'evento, analizzata tramite simulazioni del modello MOLOCH ad alta risoluzione, con passo di griglia di 500 m (Davolio et al., 2020).

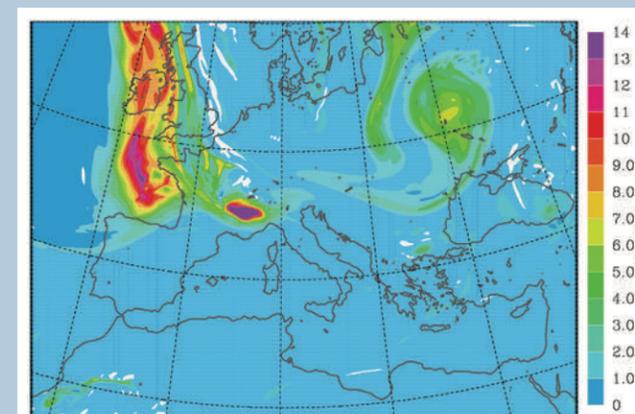
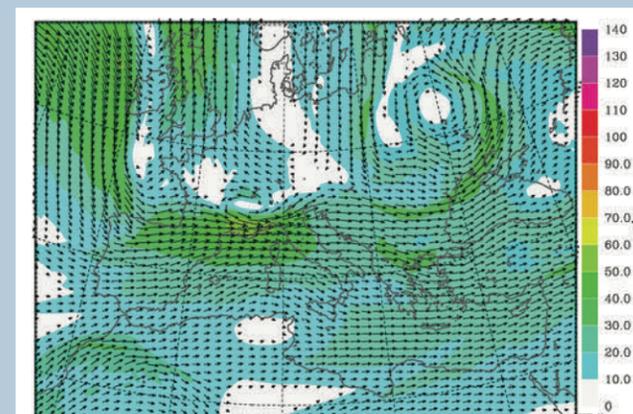
L'analisi dei dati consente di ben schematizzare i meccanismi di innesco delle supercelle del 19 settembre 2021: come evidenziato nella figura a pag. 12, dal Mar Adriatico una lingua di aria calda e umida (linee rosse) si spingeva fino alla pianura lombarda, richiamata dal minimo di bassa pressione, già menzionato in precedenza, presente sul Piemonte. Da ovest, invece, l'avanzata del "cut-off low" in quota ha causato l'ingresso dal Canton Ticino di fredde correnti da nord (linee blu). Il contrasto tra queste due masse d'aria ha determinato l'innesco di una intensa convezione atmosferica, sostenuta anche dalla divergenza del getto polare in quota.

Più a sud, durante la giornata, venti secchi sono discesi dalla catena appenninica sulla Pianura Padana (linee gialle); una volta che questi hanno interagito con la lingua calda e umida adriatica, hanno innescato lo sviluppo di ulteriore convezione intensa (tra cui la supercella responsabile del tornado di Carpi).



Nella pagina precedente, la mappa interpolata del Vento a 10 m del 19/09/2021 sull'area degli eventi, mostra l'interazione tra aria fredda dal Canton Ticino (in celeste), aria secca dagli Appennini (in rosso) e aria calda dall'Adriatico (in giallo); indicati anche luogo ed orario di due trombe d'aria osservate

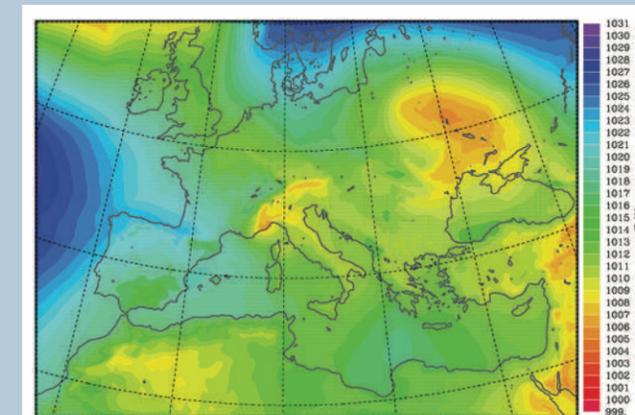
In questa pagina, le corrispondenti mappe di analisi sinottica



Per analizzare le condizioni favorevoli allo sviluppo di trombe d'aria, bisogna fare ricorso all'equazione di vorticità (Rotunno et al., 1985).

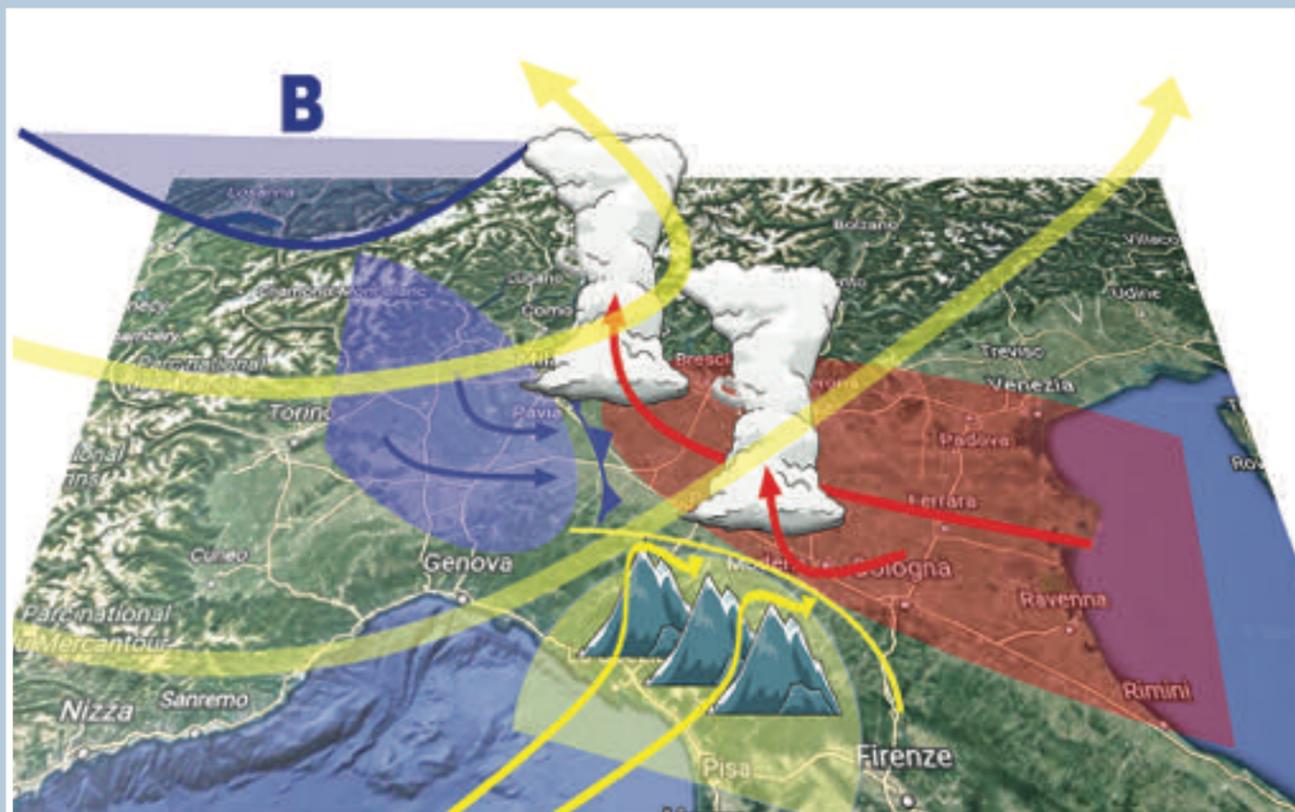
E' noto che la vorticità presente all'interno di una supercella, si genera a partire dalla sua componente orizzontale, che viene poi "raddrizzata" sull'asse verticale dalla corrente ascendente del temporale.

In questo caso, attraverso simulazioni numeriche, sono state identificate due diverse sorgenti di vorticità sul piano orizzontale, rappresentate nella figura a pag. 13: la prima localizzata a poche centinaia di metri dal suolo nei pressi del fronte freddo, dove era presente un forte gradiente di forza di galleggiamento (cosiddetto termine baroclino dell'equazione di vorticità). La seconda attorno alla quota di 1000 m, dove la vorticità veniva generata dallo shear prodotto da un Low-Level Jet (LLJ). La corrente di inflow trasportava la vorticità all'interno della supercella, nel primo caso dal lato nord-est, nel secondo dal lato sud-est. La corrente ascendente, raddrizzandone l'asse di rotazione, trasformava la componente orizzontale di vorticità in componente verticale,



che si manifestava raggiungendo picchi particolarmente intensi su alcune aree, come mostrato dalle relative mappe (figg. "a" e "b" a pag. 14).

Queste due sorgenti di vorticità hanno quindi permesso la formazione di intensi mesocycloni nei bassi livelli atmosferici, che hanno poi generato le trombe d'aria.



Lo schema di innesco delle supercelle verificatesi sul Nord Italia: le frecce gialle trasparenti indicano il flusso divergente in quota, le linee gialle il flusso secco da sud-ovest che scavalca gli Appennini, le linee rosse il flusso umido dall'Adriatico e le linee blu il flusso freddo dovuto al "cut-off low" in quota (lettera B). Le nuvole indicano le zone d'innesco della convezione

Lo sviluppo di così tante trombe d'aria era prevedibile?

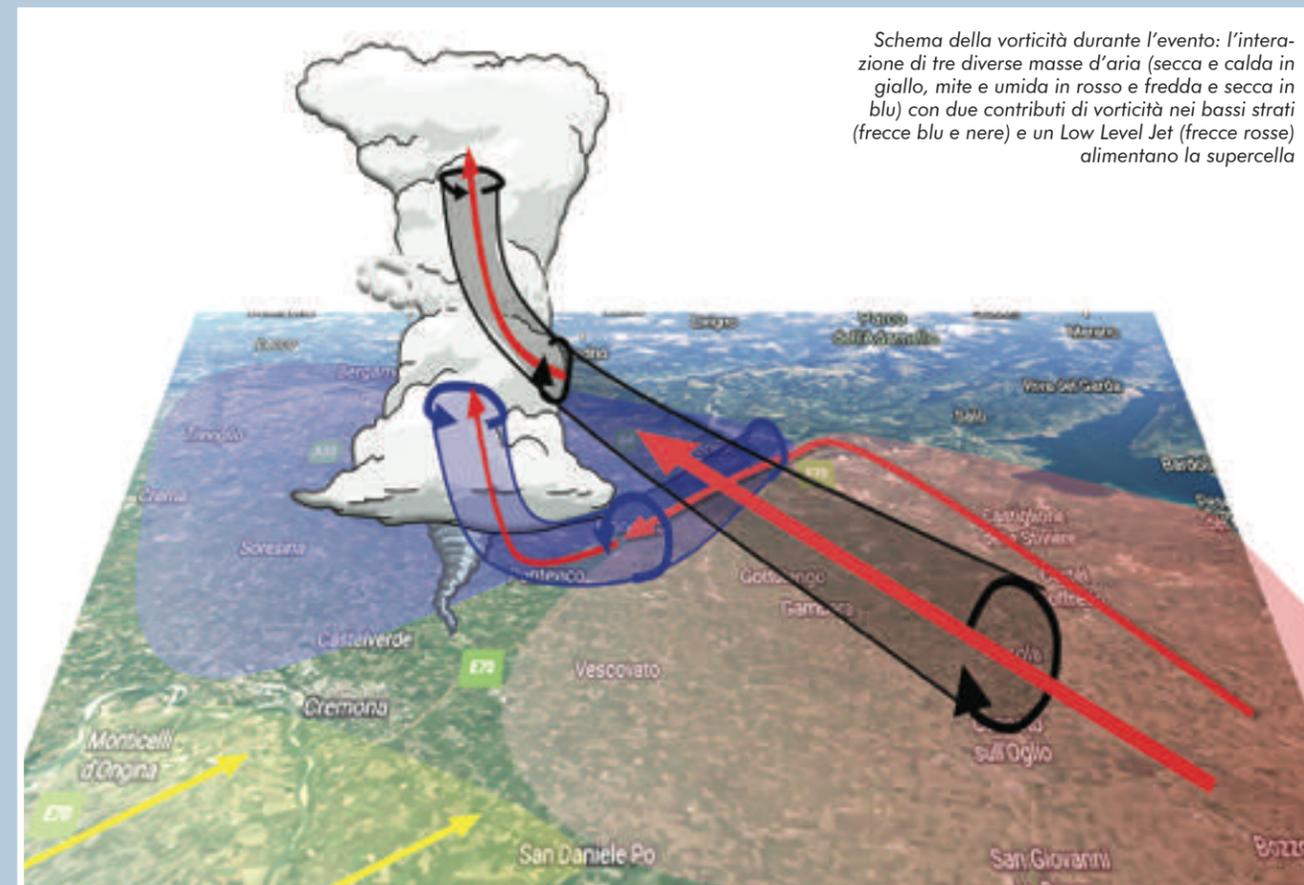
Con le attuali conoscenze e capacità dei modelli meteorologici, una buona previsione può al massimo stimare la probabilità per cui si svilupperanno temporali forti in una determinata area e momento della giornata. Una previsione capace di individuare con precisione la localizzazione spaziale e temporale dei temporali forti con un giorno di anticipo è, allo stato attuale, impossibile. Questo è ancora più vero se si vogliono prevedere le trombe d'aria, in quanto esse sono fenomeni alla microscala, molto soggette - in Italia come negli Stati Uniti - all'incertezza delle simulazioni numeriche. Dunque, la miglior previsione possibile di trombe d'aria che si può attualmente fare è una stima della probabilità del loro sviluppo in una certa area, senza scendere in ulteriori dettagli che sarebbero inevitabilmente affetti da un'incertezza troppo grande.

Il giorno prima dell'evento, il 18 settembre 2021, PRE-TEMP aveva emesso un bollettino che indicava un livello di pericolosità 2 per temporali forti sulla Pianura Padana e sull'alta Toscana; questa è confrontabile con la "Previsione Quasi Perfetta", ossia la miglior previsione che si sarebbe potuta fare, conoscendo a posteriori la distribuzione delle segnalazioni raccolte nello Storm Report (Hitchens et al., 2013). Dal confronto tra le due immagini (figg. a pag. 15) si osserva come sulla Pianura Padana la previsione ha individuato con ottima precisione il settore colpito dai fenomeni più severi, mentre sull'alta Toscana il rischio di forti temporali è risultato sovrastimato. Per quanto riguarda il rischio di trombe d'aria, nel testo si diceva che "lungo l'asse del Po, in particolare tra bassa Lombardia e basso Veneto, sussistono le condizioni per lo sviluppo di supercelle: in questo settore potrebbero cadere chicchi di grandine un po' più grossi (fino a 2-4

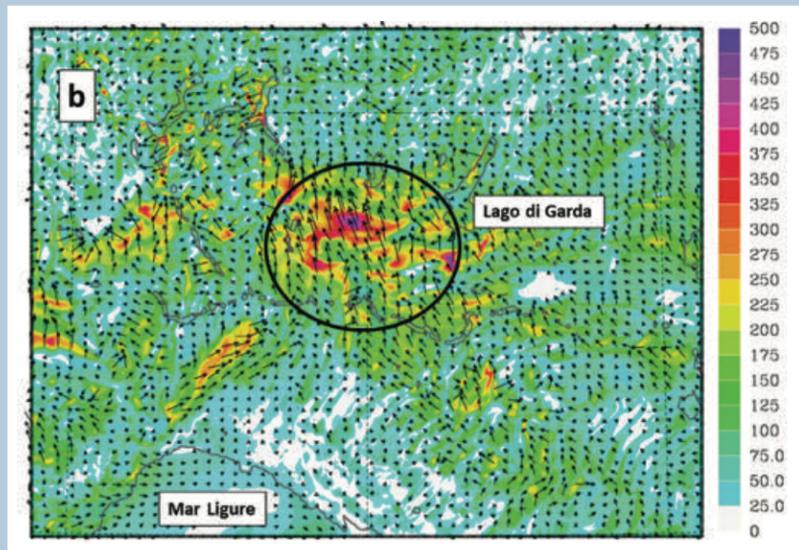
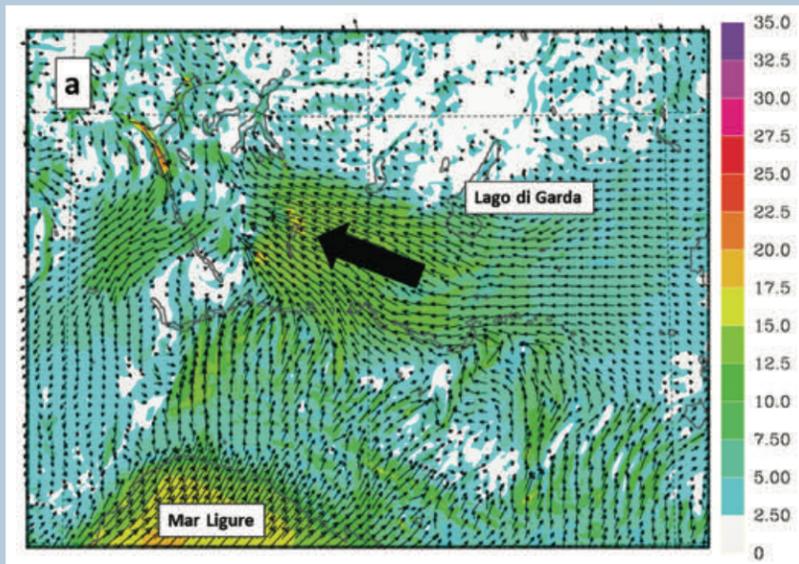
cm di diametro) ed è possibile un debole tornado mesociclonico." Effettivamente le supercelle si sono sviluppate proprio sulla bassa pianura lombarda, dove sono state anche osservate grandinate con chicchi fino a 5 cm di diametro. Tuttavia, il rischio di trombe d'aria, seppur menzionato, è stato sottostimato. Rispetto alla previsione di Antonescu et al. (2020) per la sequenza di trombe d'aria nell'Europa Centrale del 24-25 giugno 1967, in questo caso la previsione è stata meno accurata. Il motivo potrebbe essere legato alla complessa orografia della regione (rispetto alle aree pianeggianti dell'Europa Centrale e degli Stati Uniti), che rende le simulazioni meno affidabili (Miglietta et al, 2016a). In conclusione, lo sviluppo di supercelle era stato correttamente previsto nel settore dove effettivamente queste si sono sviluppate, ma il possibile sviluppo di trombe d'aria è risultato sottostimato.

Conclusioni

Il 19 settembre 2021 la Pianura Padana è stata interessata da una inconsueta sequenza di trombe d'aria, nonostante la zona sia soggetta a questo tipo di fenomeni: nel giro di quattro ore si sono formate ben 7 trombe d'aria, di cui quattro di intensità F2. L'evento è stato innescato da un "cut-off low" in quota, che dalla Francia ha attraversato la Pianura Padana. Nei bassi strati atmosferici un'avvezione di aria calda e umida dal Mar Adriatico ha creato le condizioni adatte per lo sviluppo di supercelle, innescate dall'interazione con l'aria più fredda associata a un fronte. Una supercella in Emilia invece si è sviluppata per l'interazione tra un flusso secco discendente dagli Appennini e la stessa avvezione calda e umida. La vorticità, che ha permesso lo sviluppo di intensi mesocicloni nei bassi livelli atmosferici, è stata generata sul piano orizzontale lungo il fronte freddo (per il gradiente di for-

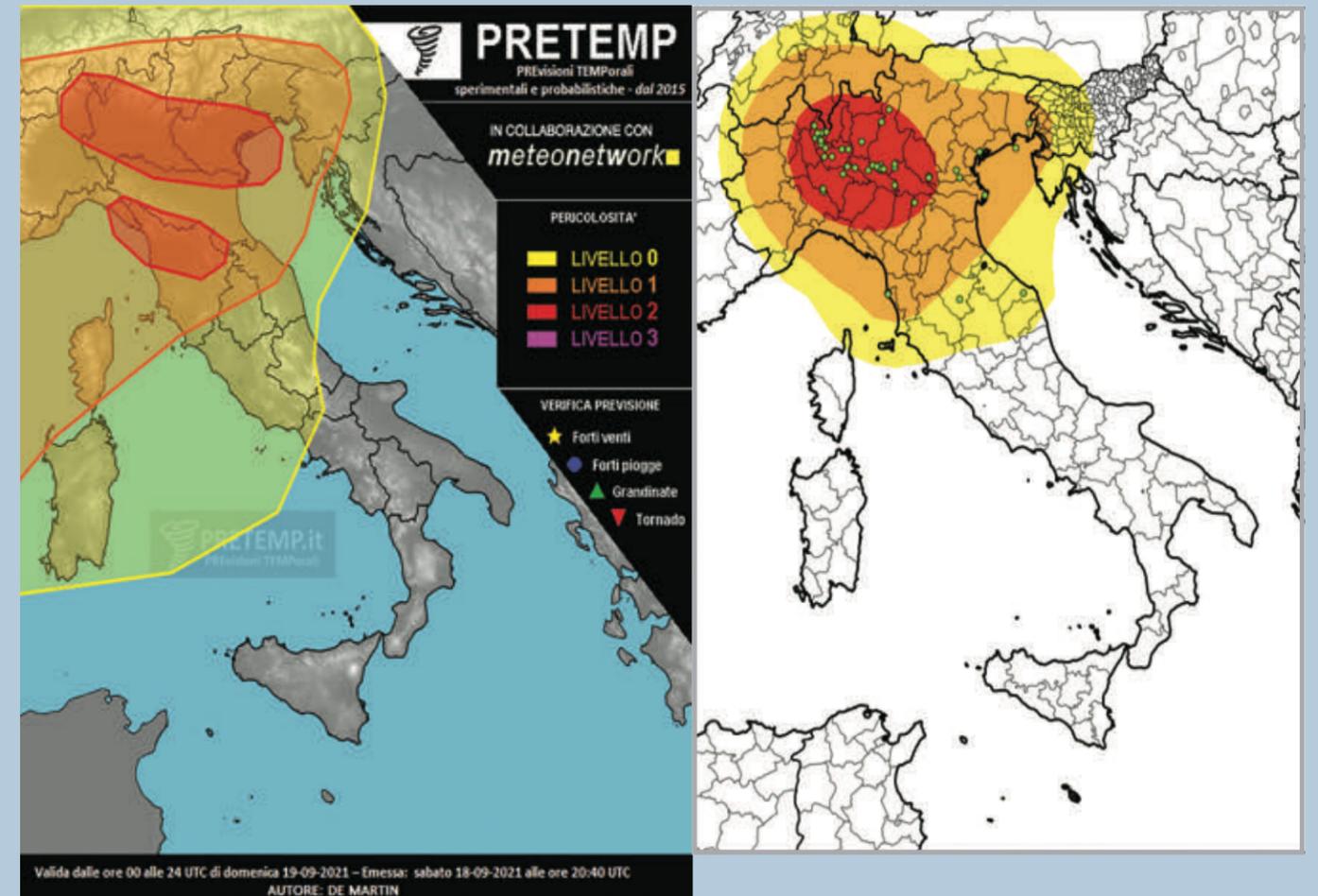


Schema della vorticità durante l'evento: l'interazione di tre diverse masse d'aria (secca e calda in giallo, mite e umida in rosso e fredda e secca in blu) con due contributi di vorticità nei bassi strati (frecce blu e nere) e un Low Level Jet (frecce rosse) alimentano la supercella



In questa pagina, due mappe previste dal modello MOLOCH per le 12.00 UTC del 19/09/2021: in alto, il Vento a 950 hPa sulla Pianura Padana (in m/s) e, in basso, la componente orizzontale della vorticità a 1000 m ($10^{-4} s^{-1}$); è evidente un Low-Level Jet (freccia nera) che origina - sull'area interna all'ellisse - intensi picchi di vorticità positiva

Nella pag. successiva, a sinistra, il bollettino PRETEMP dello stesso giorno, affiancato dalla "Previsione Quasi Perfetta", ovvero la sua verifica a posteriori



za di galleggiamento) e all'interno della lingua instabile (per la presenza di un LLJ).

La formazione di forti temporali, e in particolare di supercelle, era stata prevista il giorno precedente dall'analisi dei modelli ad area limitata disponibili sul web, come testimoniato dal bollettino di PRETEMP. Lo sviluppo di trombe d'aria invece, seppur citato come possibile, è stato sottostimato. Rispetto alla previsione della sequenza di tornado in Europa Centrale del 24-25 giugno 1967 (Antonescu et al., 2020), le trombe d'aria sono risultate meno predicibili, probabilmente a causa dell'orografia più complessa della regione.

L'esperienza di PRETEMP evidenzia la capacità di previ-

sione di sistemi convettivi intensi nel nostro Paese, tenuto conto che una previsione puntuale di questi, è allo stato attuale, impensabile.

Tuttavia, mentre lo sviluppo di forti temporali e di supercelle associati a sistemi frontali si riesce a prevedere il giorno precedente con discreta attendibilità, per quanto riguarda le trombe d'aria l'affidabilità delle previsioni è minore.

In conclusione, grazie agli sforzi del mondo scientifico, si ritiene che la capacità di prevedere le trombe d'aria in Italia stia progressivamente migliorando, seppur ancora molto debba essere fatto. Periodicamente si verificano trombe d'aria particolarmente distruttive, come per il citato evento di Carpi, a Mira e Dolo l'8 luglio 2015,

in Emilia-Romagna il 3 maggio 2013 o a Taranto il 28 novembre 2012; ciò ci ricorda come l'Italia sia un Paese molto esposto a questo rischio (Antonescu et al., 2017) e che un sistema di allertamento dedicato potrebbe mitigarne gli effetti (Miglietta et al., 2016b e Doswell III, 2003). Come nel 1948 negli Stati Uniti, quando una corretta previsione di tornado diede slancio alla creazione di un sistema di allertamento dedicato, si auspica che anche in Italia, una volta affinata la tecnica di previsione, le istituzioni decidano di far propri gli avanzamenti della ricerca al fine di istituire un sistema di allertamento dedicato per le trombe d'aria.

© Riproduzione riservata

On 19 September 2021 an unusual tornado outbreak affected the Po Valley: in less than four hours, seven tornadoes hit the Lombardia and the Emilia-Romagna regions. The event is studied by means of both surface observations, synoptic and mesoscale analysis. The synoptic forcing was provided by a cut-off low that, from France, swept all the Po Valley, while in the low-levels a warm and moist air tongue from the Adriatic Sea, a cold front crossing the Alps and a dry air mass from the Apennines played an important role. Lastly, the outlook of the PRETEMP group for that day is evaluated, with the aim of assessing the current skill in tornado forecasting in Italy. It may lead to the creation of a dedicated warning system in the future, considering the huge impacts - in terms of material damages, injuries and casualties - often related to those events.

RMA

BIBLIOGRAFIA

- Antonescu et al. (2017) "Tornadoes in Europe: an underestimated threat", Bulletin of the American Meteorological Society 98.4, pp. 713-728.
- Avolio E. and Miglietta M.M. (2022) "Tornadoes in the Tyrrhenian regions of the Italian peninsula: The case study of 28 July 2019", Atmospheric Research, p. 106285.
- Corfidi S. F. (1999) "The birth and early years of the Storm Prediction Center", Weather and forecasting, 14(4), 507-525.
- Bagagliani L., Inghrosso R. and Miglietta M.M.(2021) "Synoptic patterns and mesoscale precursors of Italian tornadoes", Atmospheric Research 253, p. 105503.
- Brooks et al. (2011) "Evaluation of European Storm Forecast Experiment (ESTOFEX) forecasts", Atmospheric research, 100(4), 538-546.
- Biron D., Springer Dordrecht (2009) "LAMPINET - Lightning Detection in Italy, Lightning: Principles, Instruments and Applications" pp. 141-159.
- Davolio et al. (2020) "The Piedmont flood of November 1994: a testbed of forecasting capabilities of the CNR-I-SAC meteorological model suite" Bull. of Atmos. Sci. & Technol. 1, 263-282. <https://doi.org/10.1007/s42865-020-00015-4>.
- Doswell III C.A. (2003) "Societal impacts of severe thunderstorms and tornadoes: Lessons learned and implications for Europe", Atmospheric Research, 67, 135-152.
- Fujita T.T. (1971). "Proposed characterization of tornadoes and hurricanes by area and intensity" (No. NASACR-125545).
- Hitchens N.M., Brooks, H.E., & Kay, M.P. (2013) "Objective limits on forecasting skill of rare events" Weather and forecasting, 28(2), 525-534.
- Huschke, R.E. (1959) "Glossary of meteorology".
- Maddox, R.A., Hoxit L.R. and Chappell C.F. (1980) "A study of tornadic thunderstorm interactions with thermal boundaries", Monthly Weather Review 108.3, pp. 322-336.
- Miglietta M.M., Manzato A. and Rotunno R.(2016a) "Characteristics and predictability of a supercell during "HyMeX SOP1", Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 142.700, pp.28392853.



- Miglietta M.M. and Rotunno R. (2016b) "An EF3 multivortex tornado over the Ionian region: is it time for a dedicated warning system over Italy?", Bulletin of the American Meteorological Society 97.3 : 337-344.
- Miglietta M.M., Mazon J. and Rotunno R. (2017) "Numerical simulations of a tornadic supercell over the Mediterranean", Weather and Forecasting 32.3, pp. 1209-1226.
- Miglietta, M.M. and Matsangouras (2018) "An updated "climatology" of tornadoes and waterspouts in Italy", International Journal of Climatology 38.9, pp. 3667-3683.
- Miglietta, M.M., Villasmunta V. et al. (2018b) "Una questione di lessico: tromba d'aria e tornado della letteratura scientifica.", Rivista di Meteorologia Aeronautica, 72, pp. 13-23.
- Pavan, F. (2022) "Eventi tornadici dell'autunno 2021: 19/09" PRETEMP report: https://www.pretemp.it/archivio/2022/studi_2022/19settembre.pdf.
- Rotunno, R., Klemp, J. (1985), "On the rotation and propagation of simulated supercell thunderstorms.", Journal of Atmospheric Sciences, 42(3), 271-292.
- Taszarek M. et al.(2020) "Severe convective storms across Europe and the United States. Part I: Climatology of lightning, large hail, severe wind, and tornadoes", Journal of Climate 33.23, pp. 10239-10261.
- http://www.atmo.arizona.edu/students/courselinks/spring13/atmo589/lecture_notes/apr18/apr18.html
- <https://www.nssl.noaa.gov/education/svrwx101/lightning/types/>
- <https://cloudatlas.wmo.int/en/home.html>

Una bella immagine della tromba d'aria del 19 settembre 2021 su Migliarina, nel Modenese (foto Laura Giorgi)

