



ACCADEMIA DI AGRICOLTURA SCIENZE
E LETTERE DI VERONA

LA PREVISIONE METEOROLOGICA OGGI: SITUAZIONE, SFIDE E PROSPETTIVE

Atti del Convegno tenuto il 1° dicembre 2017
presso l'Accademia di Agricoltura Scienze e Lettere di Verona

a cura di Claudio Carcereri de Prati

VERONA 2018



© ACCADEMIA DI AGRICOLTURA SCIENZE E LETTERE DI VERONA
Palazzo Erbisti - Via Leoncino, 6 - 37121 Verona
Tel. 045 8003668
E-mail: accademia@aslv.it - <http://www.aslv.it>

Cura editoriale di Camilla Bertani, Chiara Contri e Federica Marini

ISBN 978-88-86168-26-7

Atti realizzati con il contributo:



INDICE

CLAUDIO CARCERERI DE PRATI - Presentazione

D. ZARDI - Introduzione

PAOLO FRONTERO - Particolarità meteorologiche dell'area veronese e nuovi scenari	pag. 11
LORENZO GIOVANNINI - Previsioni casa per casa: la meteorologia a scala urbana nelle città	» 25
ANDREA PIAZZA - La necessità di elaborare previsioni meteo diverse per utenti diversi (agricoltura, viabilità, protezione civile ecc...)	» 33
FRANCESCO DOMENICHINI - Il valore delle previsioni meteorologiche	» 37
PIERLUIGI RANDI - Evoluzione di eventi temporaleschi severi	» 45
LUCA PANZIERA - <i>Nowcasting</i> di pioggia e temporali: l'esperienza svizzera	» 53
CHIARA MARSIGLI, TIZIANA PACCAGNELLA - Modellistica meteorologica previsionale ad alta risoluzione	» 59

PRESENTAZIONE

L'Accademia di Agricoltura Scienze e Lettere di Verona, tra le varie iniziative messe in atto per solennizzare il suo 250° anno di vita, ha voluto riprendere, in chiave attuale, quello che fu uno dei filoni più importanti dei suoi studi: l'analisi del clima e delle sue variazioni in rapporto alla vita umana e all'economia. Studi che l'Accademia aveva avviato pionieristicamente fin dalle sue origini ed ai quali dedicò impegno costante fino al Novecento, continuando a farne oggetto delle proprie sistematiche pubblicazioni. Oggi l'interesse per il clima è tornato di grande e, potremmo dire, drammatica attualità per le conseguenze negative causate dalle variazioni climatiche originate dall'inquinamento atmosferico e dall'effetto serra conseguente alla società industrializzata e ai consumi: lunghi periodi di siccità, desertificazione di vaste aree, irrespirabilità dell'aria, ricorrenti, isolati e terrificanti nubifragi invece delle consuete piogge stagionali del passato, nuove patologie in campo sanitario.

Avendo la fortuna d'aver fra i propri membri effettivi il professor Dino Zardi, docente di fisica dell'atmosfera e del clima presso l'Università di Trento, nonché organizzatore di iniziative e progetti interuniversitari di livello internazionale, l'Accademia ha ritenuto di affidare a lui l'organizzazione d'un convegno d'alto profilo. Il professor Zardi ha lavorato, con la competenza che gli è propria, coinvolgendo un nutrito manipolo di studiosi giovani, dinamici, esperti al tempo stesso impegnati in vari organismi istituzionali che si occupano di clima, ne monitorano manifestazioni e variazioni, ne conoscono e valutano effetti e conseguenze a tutti i livelli della vita odierna. Ne è nato un convegno di grande risonanza, i cui contenuti l'Accademia ha voluto raccogliere nel presente volume di Atti che potrà essere utilizzato proficuamente dalle istituzioni, dalle pubbliche amministrazioni e dalle università.

In esso, dopo le considerazioni del professor Zardi, sono riportate le memorie elaborate dagli studiosi: il fisico e meteorologo Paolo Frontero, già funzionario dell'Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente del Veneto, si è occupato degli scenari del cambiamento climatico nel territorio veronese; il professor Lorenzo Giovannini, ricercatore presso l'Università di Trento ed esperto di modellistica meteorologica con particolare interesse sui processi a scala urbana, ha investigato le cause delle alterazioni climatiche urbane, indicandone le conseguenze e illustrando possibili interventi anche attraverso l'uso di nuo-

vi materiali; Andrea Piazza, previsore di Meteotrentino, ha trattato con competenza le connessioni tra previsioni meteorologiche e mondo dell'economia turistica; Francesco Domenichini, funzionario dell'ARPA Veneto, ha trattato dell'attendibilità delle previsioni; Pierluigi Randi, presidente dell'Associazione Emilia-Romagna Meteo, ha illustrato le modalità attraverso le quali vengono condotte le previsioni di eventi meteorologici intensi; il dottor Luca Panziera, previsore presso Meteo Svizzera, ha parlato di *Nowcasting* di pioggia e temporali riferendosi alla sua esperienza svizzera; infine la dottoressa Tiziana Paccagnella, dirigente responsabile di Area Modellistica Meteorologica Marina, Servizio Idro-Meteo-Clima, Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente dell'Emilia Romagna, e la dottoressa Chiara Marsigli, esperta di modellistica previsionale presso la stessa Agenzia, hanno svolto un'ampia relazione sui modelli meteorologici per previsioni ad alta risoluzione.

L'Accademia ritiene con soddisfazione d'aver dato adempimento ad un suo dovere istituzionale nei confronti della società civile e della comunità scientifica ed esprime a tutti gli studiosi che hanno portato il loro contributo di sapienza e di esperienza al convegno il proprio convinto apprezzamento e la propria gratitudine.

Claudio Carcereri de Prati

Presidente dell'Accademia di Agricoltura Scienze e Lettere di Verona

DINO ZARDI*

Introduzione

Negli ultimi anni la meteorologia ha conosciuto uno straordinario sviluppo. Ciò è dovuto senz'altro alla diffusione di soluzioni tecnologiche sempre più innovative, che hanno moltiplicato le opportunità di effettuare osservazioni sullo stato dell'atmosfera e trasmetterle ai centri di raccolta e smistamento. Anche lo sviluppo di sistemi di calcolo sempre più potenti ed efficaci per la simulazione numerica dei processi atmosferici a risoluzioni sempre più elevate ha contribuito a questa crescita. Ma l'impatto maggiore sulla società si è avuto dalla rapida diffusione di sistemi di comunicazione e di rappresentazione del dato estremamente maneggevoli, multimediali ed efficaci come cellulari, palmari e tablet. Questa crescente accessibilità del dato e della previsione stimola aspettative sempre più pressanti, da parte di un pubblico variegato ed esigente, ponendo al tempo stesso un conflitto fra la richiesta di informazione rapida, e disponibile con grande anticipo, e la necessità di garantire l'attendibilità e il rigore metodologico.

Su questi temi si è focalizzata la giornata di studio organizzata il 1° dicembre 2017 dall'Accademia di Agricoltura Scienze e Lettere di Verona sul tema: "La previsione meteorologica oggi: situazione, sfide e prospettive". Affrontando diversi aspetti della questione, i relatori hanno fornito da varie angolature visuali interessanti sui problemi, ma anche sulle opportunità offerte dai recenti progressi. Ne è emerso un quadro stimolante, che traccia alcune possibili linee di sviluppo di un'organizzazione più efficace dei servizi meteorologici, mediante un'oculata sinergia tra ricerca e servizi, ambito pubblico e ambito privato, organizzazioni professionali e associazioni amatoriali.

* Membro effettivo dell'Accademia di Agricoltura Scienze e Lettere di Verona, Professore di fisica dell'atmosfera e del clima, Università di Trento.

PAOLO FRONTERO*

Particolarità meteorologiche nell'area veronese e nuovi scenari

RIASSUNTO: Il clima del Veneto è di tipo sub continentale con caratteristiche simili a quello mediterraneo, ma con inverni molto più freddi; secondo la classificazione di Koppen l'area di Verona ha un clima di tipo Cfa/CSa. Le principali zone climatiche dipendono dall'orografia locale: a causa delle catene (Alpi e Appennini) la Pianura Padana è circondata su tre lati e risulta, quindi, un bacino semichiuso, che provoca nella stagione estiva un notevole riscaldamento e umidificazione dei bassi livelli dell'aria a cui contribuisce anche il Lago di Garda. Questi sono 'ingredienti' per lo sviluppo di convezione profonda che, associato al transito di sistemi frontali, genera temporali anche forti accompagnati spesso da grandine.

Nel periodo autunnale-invernale la peculiarità del territorio veronese riguarda le intense precipitazioni anche di tipo alluvionale nel caso del passaggio di saccature atlantiche o depressioni, specie se queste sono bloccate da anticicloni sui Balcani. La bassa nevosità del territorio veronese è attribuibile essenzialmente all'orografia ed agli effetti sciroccali. I cambiamenti climatici stanno causando un progressivo incremento della temperatura media e delle ondate di calore evidenziate dal maggior numero di temperature massime oltre i 30 e 35 gradi registrato negli ultimi 60 anni. Ciò va di pari passo con l'aumento dei periodi siccitosi sempre più problematici per la nostra agricoltura. Per finire un cenno sull'aspetto dell'inquinamento che, pur con segnali di lieve riduzione rispetto al passato, risulta sempre condizionato dalle varie sorgenti antropiche e dalla formazione di duraturi anticicloni.

PAROLE CHIAVE: clima, meteorologia, cambiamenti climatici, inquinamento, orografia.

ABSTRACT: The climate of Veneto is sub-continental oriented than Mediterranean, the winters are much colder than in a Mediterranean climate; according Koppen classification the Verona area has a climate of the Cfa/CSa type. The main principal climate zones depend on the local orography: due to orographic chains (Alps and Apennines) the flat Po Valley is surrounded on three sides, therefore it is a semi-closed basin, this facilitates in summer season heating and humidification of low-level air thanks to a contribution of Garda Lake; these are the "ingredients" favourable for convection development especially during the passage of frontal structure that generate thunderstorm sometime with heavy precipitations and hail fall. During winter period intense troughs or cyclogenesis eastward moving, can be blocked by Balkan anticyclones; this cause stationary heavy precipitation on Veneto that sometimes produce flash-flood. The winter snowfall are weak or turns, due to the Scirocco wind, into rain in a short time. The aforementioned condition of orographic basin and to the wind calm, are ideal conditions for the accumulation of pollutants during stationary winter anticyclones. The climatic changes, already in progress, determine progressive increase in the average temperature and the heat waves as highlighted by the highest number of maximum tempe-

* Fisico e meteorologo, già funzionario dell'Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente del Veneto.

ratures above 30 and 35 degrees observed in the last 60 years. This goes hand in hand with the increase in droughts that makes our agriculture vulnerable.

KEYWORDS: climate, meteorology, climate change, air pollution, orography.

Nella seguente relazione si illustra la tipologia climatica di Verona e provincia, inquadrandola nel contesto più generale del clima della Pianura Padana; in seguito verranno evidenziati i fenomeni e le situazioni meteorologiche più rappresentative del clima scaligero. Infine si esamineranno gli scenari, per altro già in atto, dovuti al cambiamento climatico globale.

1. CARATTERIZZAZIONE CLIMATICA DI VERONA



Figura 1. Le aree climatiche del nord Italia.

L'Italia settentrionale si può suddividere nelle seguenti cinque aree climatiche: adriatica, padana centrale, padana occidentale, tirrenica e alpina (figura 1).

Il territorio della provincia di Verona abbraccia due di queste aree: quella padana centrale, costituita dalle zone pianeggianti, e quella alpina, individuata dai Monti Lessini. Per tale peculiarità si presentano diversi microclimi relazionati alla morfologia del territorio:

- zone di bassa pianura (le aree più meridionali del territorio provinciale);
- zone di alta pianura;
- zone di alta montagna (Monte Baldo e Lessinia);
- zone vallive, che possono a loro volta presentare caratteri diversi a seconda che si tratti di valli profonde (Val d'Adige) o valli più basse (come Valle di Fumane, Valpantena, Val d'Illasi, Val d'Alpone);
- zone lacustri (aree costiere del lago di Garda).

1.1 Classificazione climatica di Verona secondo Köppen

Ricordiamo che per poter effettuare una classificazione del clima di una certa località sono necessari almeno trent'anni di dati consecutivi omogenei, che ottemperino alle norme OMM (Organizzazione Meteorologica Mondiale). Sul nostro territorio l'unica stazione che soddisfa gran parte di questi requisiti è quella di Villafranca di Verona, stazione rappresentativa del clima delle zone pianeggianti della nostra provincia. Prendendo in considerazione il periodo 1961-1990 e applicando la classificazione climatica di Köppen, è stata analizzata la temperatura media del mese più freddo e più caldo e le precipitazioni del mese più piovoso e meno piovoso (figura 2).

1.2 I microclimi di Verona e provincia

Come detto in precedenza, la diversa tipologia orografica del territorio influenza direttamente il clima, creando così andamenti termici e pluviometrici diversi andando dalla pianura, proseguendo per la zona pedemontana e finendo ai tipici climi montani dell'alta Lessinia. Limitandosi alla zona pianeggiante, la tipologia climatica (figura 3) è quella continentale con inverni abbastanza rigidi ed estati calde e afose.

Una caratteristica tipica è la stagnazione delle masse d'aria a causa della scarsa circolazione associata alle strutture anticicloniche dette di blocco; si generano così le inversioni termiche che determinano nel periodo invernale nebbie e ristagno degli inquinanti.

1.3 La pluviometria a Verona

Esaminando i due trentenni climatologici 1960-1991 e 1981-2010 (figura 4) si evidenzia per Verona un totale medio cumulato annuo di 821 mm nel periodo 1960-1991, con 81 giorni di precipitazione (con giorno piovoso si intende un accumulo maggiore o uguale di 1 mm di pioggia o equivalente di neve fusa).

I massimi di precipitazioni sono stati calcolati per il territorio Veneto tramite l'analisi di Gumbel (figura 5); si notano, in particolare, i valori delle precipitazioni per intervalli di tempo che vanno da 5 minuti fino a 5 giorni per la stazione di Verona Villafranca.



Figura 2. Periodi climatici per Verona Villafranca e individuazione del tipo di clima secondo Köppen.



Figura 3. Caratteristiche climatiche delle zone pianeggianti del territorio veronese.

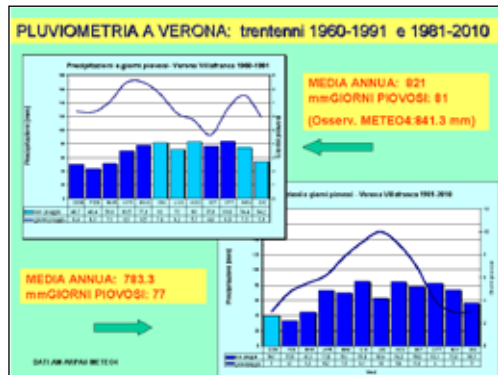


Figura 4. Andamento pluviometrico e numero di giorni piovosi medi annui a Verona Villafranca nei due trentenni 1960-1991 e 1981-2010.

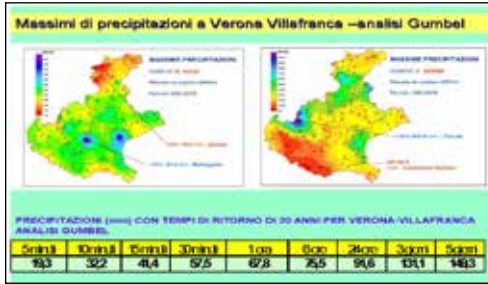


Figura 5. Massimi di precipitazione rispettivamente di 15 minuti (mappa a sinistra) e di 30 giorni (mappa a destra) tramite il metodo di Gumbel per il territorio Veneto. In basso massimi di precipitazione per Verona Villafranca.

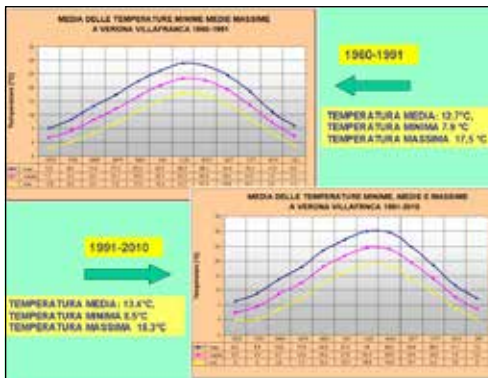


Figura 6. Andamento medio termico annuo a Verona Villafranca nei due trentenni 1960-1991 e 1981-2010.

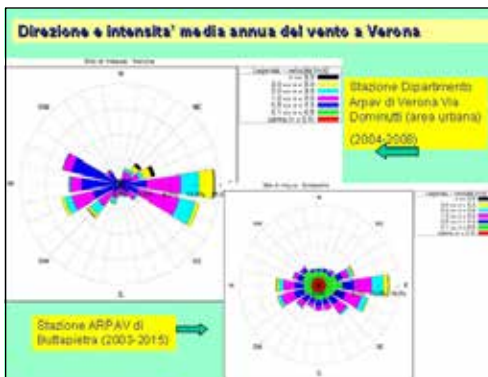


Figura 7. Rosa dei venti di Buttapietra e Verona sede Dipartimento Arpav di Verona, dove si nota la provenienza prevalentemente orientale del vento.

1.4 L'andamento termico a Verona

Nella figura 6 viene riportato l'andamento termico medio annuo a Verona Villafranca per il periodo di riferimento climatologico 1960-1991 (indicazioni WMO) e quello 1991-2010. A causa dei cambiamenti climatici in atto, si nota come tutti i valori del secondo periodo climatologico risultino avere valori maggiori.

1.5 Stato anemologico di Verona

Nella figura 7, sono riportate le rose dei venti di Buttapietra, località rappresentativa di Verona città, e la stazione meteo del Dipartimento Provinciale Arpav di Verona (pur con periodo di osservazione limitato a 4 anni).

Da entrambe le rose dei venti si nota come il vento prevalente provenga dai quadranti orientali. Questo sarebbe in contraddizione con la direttrice ovest-est del flusso zonale alle nostre latitudini.

Da un'attenta analisi sinottica, si nota come siano presenti nel territorio veronese due situazioni che apportano, specie nei bassi strati, dei venti orientali. La prima, in concomitanza di flussi sciroccali associati alla presenza di minimi depressionali sul Golfo di Genova o sull'Alto Tirreno o che precedono perturbazioni atlantiche, fa sì che tali flussi, originariamente da sud-est, pieghino per effetto orografico delle Alpi orientali per giungere sulle nostre zone da est o nord-est.

La seconda situazione, che ha incidenza prettamente estiva, riguarda

i venti regolari di brezza, in cui la componente diurna più intensa proviene proprio dai quadranti orientali o sud-orientali.

1.6 Situazioni sinottiche che causano forti precipitazioni sull'area veronese

Di seguito esaminiamo le configurazioni bariche più significative per il territorio veronese che determinano forti precipitazioni. La prima è una profonda saccatura collocata sull'Europa occidentale che determina un flusso sudoccidentale che impatta sul versante sud alpino. L'arrivo di aria polare fredda dal nord Atlantico determina la formazione di sistemi depressionari di tipo baroclinico ad ovest e nord-ovest dell'Europa, originando una saccatura in spostamento verso il Mediterraneo centrale, che con venti sudoccidentali in quota determina un forte peggioramento su Verona e tutto il Veneto (figura 8).

La seconda è un'altra saccatura ferma nello stesso posto con blocco anticiclonico ad est. Molto simile alla precedente, ma con la presenza di un'azione bloccante di alte pressioni a est del Mediterraneo: questo determina la persistenza di precipitazioni su tutto il nord Italia, con situazioni potenzialmente alluvionali anche sulle Prealpi Veronesi (figura 9).

La terza configurazione barica è il minimo depressionario persistente sul Golfo di Genova. Si tratta di una situazione classica di ciclogenesi, cioè a circolazione chiusa sul Mar

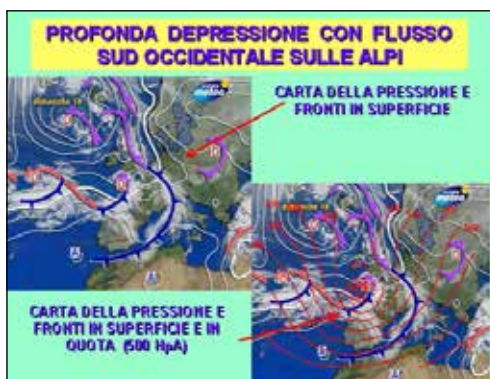


Figura 8. Depressione con flusso sud occidentale verso le Alpi meridionali.



Figura 9. Flusso perturbato di tipo meridiano bloccato ad est da un sistema anticiclonico.



Figura 9bis. Profonda depressione sul Golfo di Genova o Alto Tirreno in trasferimento verso levante; nel veronese forte maltempo con piogge intense e venti di bufera tra est e nord-est di origine sciroccale.

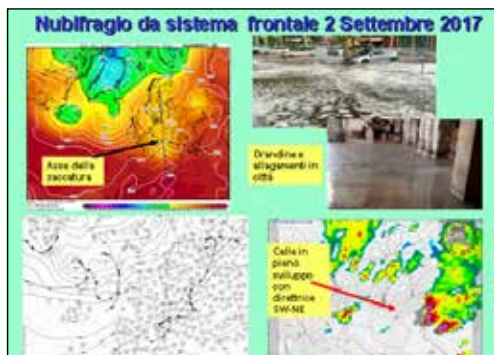


Figura 10. I nubifragi sono caratteristici del passaggio di fronti freddi attraverso la Valpadana. Le nubi termo convettive associate possono produrre forti precipitazioni fino a massimi di 50-60 mm/ora.

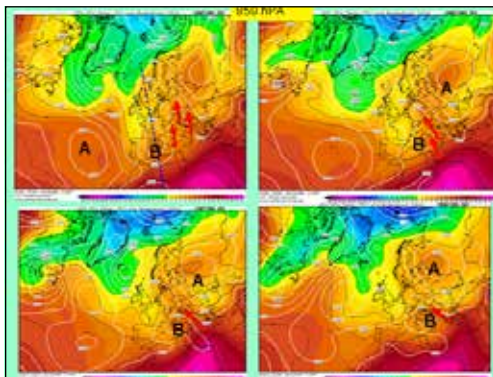


Figura 11. Ricostruzione del campo geopotenziale di 850 hPa durante i giorni dell'alluvione del 17 settembre 1882.



Figura 12. Testimonianze su pietre cittadine dell'altezza a cui arrivarono le acque del fiume Adige.

Ligure (figura 9bis); è legata all'evoluzione di una depressione formata sul Mediterraneo occidentale ed in progressivo spostamento verso levante. Pertanto le regioni nord-orientali sono investite da correnti di origine sciroccale caldo-umide. Il gradiente barico risulta molto elevato e ciò crea una delle situazioni con maggiore intensità di vento nel veronese. Infine, il transito di fronti freddi nel periodo estivo sulla Valpadana surriscaldata.

Durante l'estate, in condizioni di alta pressione, la Valle Padana accumula di giorno in giorno energia e vapore acqueo; questo rappresenta il 'combustibile' che si rende disponibile al transito di un fronte freddo (Figura 10), il tutto accentuato dalla particolare orografia della zona.

Per questo in certe situazioni si possono registrare precipitazioni molto intense in poco tempo, fino a 50-60 mm in un'ora.

2. EVENTI ALLUVIONALI STORICI A VERONA

I casi alluvionali più rilevanti del passato sono stati: l'evento drammatico del 17 settembre 1882, con la rottura degli argini del fiume Adige, che causò danni e vittime in città e quello del 3 e 4 novembre 1966, che colpì pesantemente la Toscana con l'esonazione dell'Arno, ma che interessò pesantemente tutto il nord-est d'Italia.

L'Adige in piena creò un forte allarme su tutto il territorio tracciando a Pescantina di Verona.

Entrambe le situazioni alluvionali furono causate da diversi fattori concomitanti, ma comuni: un apporto precoce di neve in montagna specie nei bacini orografici del Trentino e Alto Adige, un successivo rapido aumento dello zero termico a causa delle correnti sciroccali con fusione della neve ed infine una fase di intense e persistenti piogge fino a quote molto alte.

2.1 Situazione sinottica del 17 settembre 1882

La situazione sinottica a 500 hPa vide il giorno 15 settembre 1882 una saccatura stazionaria con asse dalla Tunisia fino alla Gran Bretagna; il geopotenziale a 850 hPa (figura 11) evidenziò una struttura simile, facendo spiccare l'orientazione meridiana del flusso nei primi 2000 metri. Tale congiuntura persisté per più di quattro giorni. Anche la cronaca del tempo testimonia questo apporto caldo (figura 12), pur non aspettandosi le conseguenze devastanti che ci sarebbero poi state (figura 13).

2.2 Situazioni sinottica del 3-4 novembre 1966

Molto simile alla precedente per le strutture bariche dominanti, durante l'alluvione del 3 e del 4 Novembre 1966 si osserva una saccatura in quota con asse anch'essa dalla Tunisia fino ad ovest della Norvegia, mentre nei bassi strati si notano trasporti meridiani di massa d'aria più calda ad alto rapporto di mescolamento (figura 14).



Figura 13. Foto e ricostruzioni dei danni prodotti al centro storico di Verona nei punti di rottura degli argini.

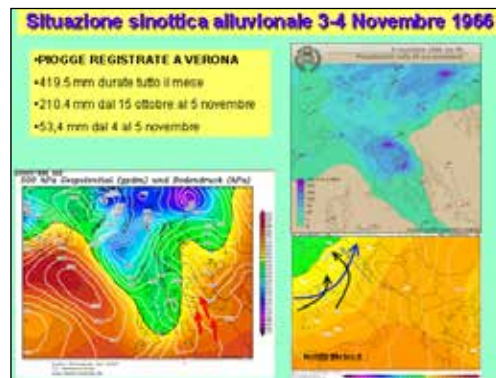


Figura 14. Struttura del geopotenziale di 500 hPa (a sinistra) e del flusso nei bassi strati (a destra) durante la fase più critica della piena dell'Adige nel veronese.



Figura 15. Livello molto pericoloso dell'Adige in città, testimonianza di allagamenti degli scantinati (foto in alto) e parziali allagamenti a Pescantina (in basso).

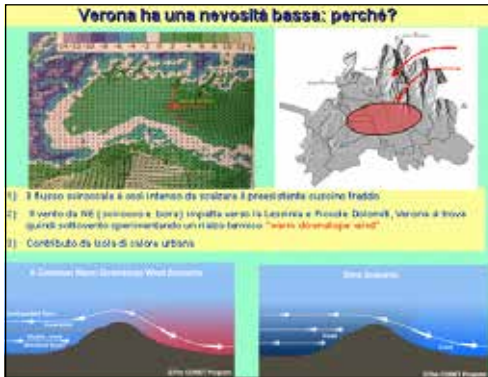


Figura 16. Fattori orografici e dinamici che rendono la città di Verona meno nevosa di altre città limitrofe.

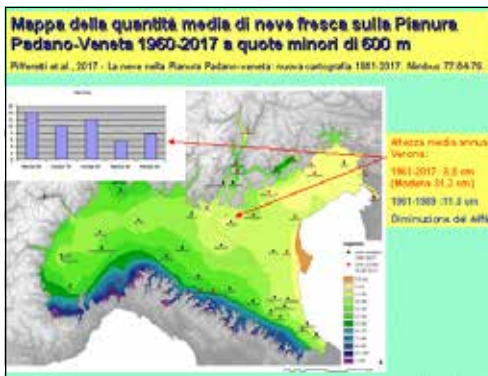


Figura 17. Climatologia della neve a Verona e provincia.

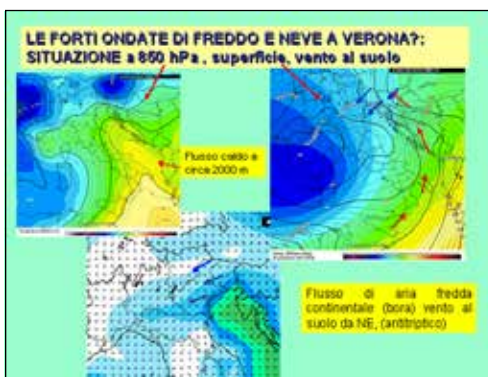


Figura 18. Requisiti per neve e freddo a Verona: flusso freddo continentale nei bassi strati e presenza di una depressione sul Mediterraneo occidentale con flusso caldo umido agli strati medi.

Sul veronese, nel solo mese di novembre, vengono misurati la metà dei millimetri di pioggia che cadono in tutto l'anno. Ciò causa una pericolosa piena dell'Adige a Verona città ed un tracimamento dello stesso a Pescantina (figura 15).

3. SITUAZIONE PER NEVICATE E FREDDO A VERONA

La città di Verona, per alcuni fattori orografici e termodinamici (figura 16), risulta avere una bassa nevosità tipica, in realtà, delle zone costiere (figura 17).

Le situazioni meteo-sinottiche più significative, che possono dar luogo a nevicate fino in pianura con deposito al suolo, sono essenzialmente due: la prima, non molto frequente e che determina nevicate anche persistenti con temperature associate molto basse, si realizza con un concomitante afflusso, nei bassi strati, di aria continentale artica dalla Siberia, e di una avvezione di aria caldo-umida attorno ai 1500 m (figura 18); la seconda, più comune, detta di 'addolcimento' avviene dopo che si è in precedenza costituito un cuscinio di aria fredda nella Pianura Padana e quando successivamente transitano su di esso perturbazioni atlantiche che scaricano precipitazioni nevose fino al suolo.

La temperatura risulta inizialmente attorno agli zero gradi, ma frequentemente i sempre più penetranti flussi sciroccali trasformano ben presto la neve in pioggia.

3.1 Febbraio 1929, quando l'Adige si ghiacciò

La struttura sinottica ricostruita evidenzia lo schema visto in precedenza con un'alta pressione sulla Finlandia e una bassa sul Mediterraneo centrale (figura 19); con tale situazione masse di origine siberiana affluirono verso la nostra regione apportando copiose nevicate e temperature in centro cittadino fino a -13 gradi centigradi, l'Adige ghiacciò in diversi tratti (figura 20).



Figura 19. Mappa al suolo della situazione del febbraio 1929.

4. I TEMPORALI A VERONA

Verona, trovandosi in posizione adiacente all'orografia prealpina e al Lago di Garda che, nel periodo estivo, immette notevoli quantità di vapore acqueo, risente di un numero elevato di fenomeni temporaleschi dovuti al transito di sistemi frontali. Lo schema concettuale (figura 21) evidenzia un concomitante effetto di sollevamento dinamico frontale, sollevamento orografico e presenza di un *low level jet* caldo-umido nei primi strati. Assieme alle Prealpi Piemontesi, la zona del veronese a vocazione agricola con coltivazioni di vigneti, presenta un numero elevato di temporali con grandine. I principali tipi di temporali che interessano il veronese sono:

- temporali frontali: transito di fronti freddi, in genere facilmente prevedibili;
- temporali di instabilità: dovuti a piccole infiltrazioni di aria fredda in quota, senza la presenza di un vero e proprio fronte; si individua-



Figura 20. Mappa originale dell'11 febbraio 1929 e foto dell'Adige ghiacciato a Porto di Legnago.

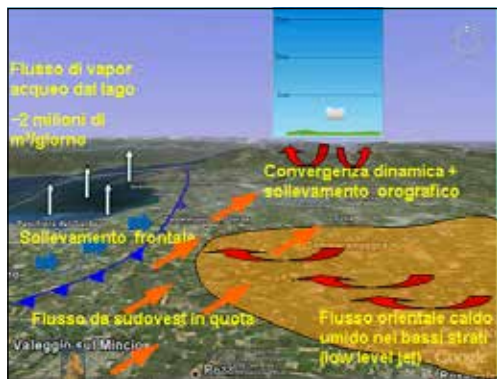


Figura 21. Schema concettuale del transito di sistemi frontali responsabili di temporali anche grandinosi sul Veronese.

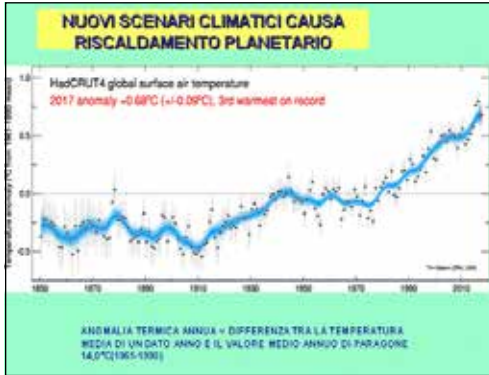


Figura 22. Anomalia termica planetaria dal 1850 ad oggi, si evidenzia il rapido incremento dagli anni 80.

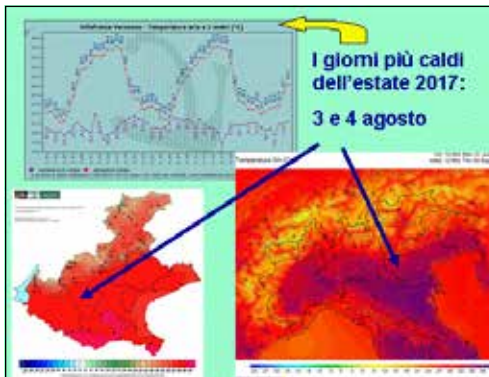


Figura 23. L'ondata di caldo dell'agosto 2017 a Verona e nel resto del Veneto.



Figura 24. Anomalie termiche annue dal 1951 ad ottobre 2017 elaborate per la stazione OMM di Verona Villafranca.

no bene le condizioni favorevoli ma non si sa con precisione dove e quando colpiranno;

- temporali di calore: si sviluppano in aree circoscritte in giornate molto calde estive, in genere di breve durata;
- temporali prefrontali: i più pericolosi e subdoli, molto difficili da prevedere anche 24 ore prima, interessano in modo violento aree abbastanza ristrette, mascherati dalla foschia del lago e della pianura.

Il Baldo e i Lessini esaltano per sollevamento forzato i temporali frontali e prefrontali specie quelli da ovest o sud-ovest; le statistiche ci dicono che nel veronese si verificano circa 40 temporali annui di cui 30 grandinigeni; in agosto, ad esempio, la probabilità che si abbia un giorno di grandine è pari al 41%.

5. COME CAMBIA IL CLIMA A VERONA

L'anno 2017 è risultato, a livello planetario, il terzo più caldo dal 1850 (figura 22) e, come evidenziato dall'IPCC, la causa principale è di tipo antropico, a seguito dell'immissione di diossido di carbonio nell'atmosfera. Le ultime osservazioni di fine 2017 hanno fatto registrare valori attorno ai 410 ppm. Anche la nostra provincia purtroppo non è esente da questo riscaldamento a scala planetaria. Una conseguenza immediata è l'incremento di estati caratterizzate da ripetute ondate di calore, come quella dell'estate 2017 che ha

visto, a Verona, ben 7 ondate di caldo con valori massimi termici quasi da record il 3 e 4 agosto (figura 23).

5.1 Trend delle anomalie delle temperature a Verona

Come detto sopra, anche Verona registra un andamento termico molto simile a quello planetario; analizzando, infatti, le anomalie della temperatura media della sede storica di Verona Villafranca dal 1951 ad oggi (figura 24) si osserva che il trend risulta in costante aumento. Ancor più significativi risultano sia l'aumento del numero di giorni con temperature massime maggiori a 30 gradi sia quello con massime oltre i 35 gradi (figura 25).

5.2 Inquinamento a Verona

I cambiamenti climatici su scala planetaria hanno anche un'influenza sulla circolazione generale atmosferica con un'alterazione della posizione di alcuni centri di azione. Uno di questi è l'anticiclone delle Azzorre che negli ultimi anni sembra essersi esteso a latitudini più settentrionali. Ciò significa un maggior numero di giorni di alta pressione anche sulle nostre regioni; ciò, come abbiamo visto, risulta essere spesso associato in estate ad ondate di calore ed in inverno a situazioni di scarsa dispersione degli inquinanti. Gli anticicloni invernali agiscono nella Pianura Padana favorendo inversioni termiche con ristagno di inquinanti, tra i quali i più importanti risultano essere le polveri fini. Quindi, l'incremento della presenza



Figura 25. Trend dal 1951 ad oggi del numero di temperature massime superiori a 30 e 35 gradi a Verona Villafranca.



Figura 26. Situazione di inquinamento associata alla presenza e persistenza di alte pressioni sull'Italia.

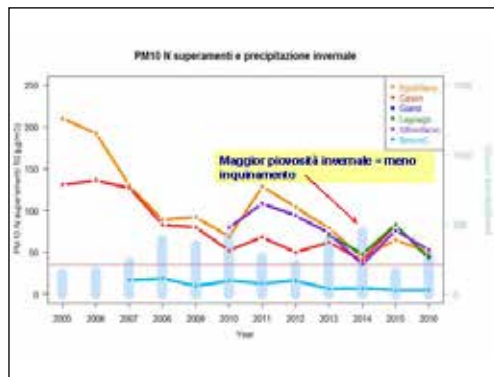


Figura 27. Trend del PM10 nelle centraline di rilevamento Arpav a Verona e Provincia dal 2005 al 2016.

e della persistenza degli anticiclone significa, ai fini dell'inquinamento, un aumento della concentrazione di PM10, PM2.5 ecc. in inverno e di ozono in estate (figura 26).

5.3 Trend del PM10 a Verona

Anche il territorio di Verona, essendo inserito nel bacino padano-adriatico, sperimenta, nelle situazioni contingenti di blocco anticiclonico, periodi di costante e progressivo accumulo degli inquinanti. In Figura 27 è mostrato l'andamento dal 2006 al 2016 del numero di superamenti annui del limite giornaliero di 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ delle concentrazioni di PM10, misurate presso le centraline di Verona gestite dal Dipartimento Provinciale ARPAV. Si nota che rispetto ai primi anni vi è stata una diminuzione della concentrazione grazie ad alcuni provvedimenti di conversione a gas di molti mezzi pubblici, nonché al miglioramento delle emissioni delle auto. Tale diminuzione è anche attribuibile alle condizioni meteorologiche: vento e precipitazioni, infatti, giocano un ruolo fondamentale sulla dispersione dei vari inquinanti.

5.4 Adattamento di verona ai nuovi scenari climatici



Figura 28. Scenari climatici già in atto e previsti per il territorio veronese.

Purtroppo nell'imminente futuro, a seguito del riscaldamento globale, anche Verona risentirà sempre più degli scenari climatici che sono previsti in ulteriore incremento (figura 28). Essi interesseranno le condizioni fisiologiche meteo-ambientali in cui vivremo, nonché avranno un ruolo rilevante nell'adattamento della nostra agricoltura così preziosa e vitale per la popolazione. Si dovrà sempre più far ricorso alla 'agricoltura digitale', cioè ad una programmata gestione dell'agricoltura tramite l'utilizzo di mezzi informatici e telematici per il miglioramento e adattamento delle varie fasi fenologiche, la scelta e gestione di colture meno idroesigenti, un'ottimizzazione nella rotazione e semina ecc.

6. CONCLUSIONI

Si sono esaminate le particolarità meteorologiche più rilevanti per il territorio veronese; esse riguardano essenzialmente l'aspetto delle intense precipitazioni, in alcuni casi di tipo alluvionale, la bassa nevosità del territorio veronese, attribuibile essenzialmente all'orografia ed all'effetto sciroccale, ed infine l'alta frequenza di attività temporalesca estiva, spesso di tipo grandinigeno. I

cambiamenti climatici già in atto stanno tuttavia rimodulando queste particolarità, aggiungendo un progressivo incremento della temperatura e delle ondate di calore, evidenziato dal maggior numero di temperature massime oltre i 30 e 35 gradi. Ciò va di pari passo con l'aumento dei periodi siccitosi sempre più problematici per la nostra agricoltura. Per finire, c'è l'aspetto dell'inquinamento che, pur con segnali di lieve riduzione, diventa sempre più condizionato dai nuovi scenari climatici.

Bibliografia

ARPAV, *Rapporto sullo stato dell'ambiente della Provincia di Verona*, 2016.

Consiglio regionale del Veneto Unità complessa studi documentazione e biblioteca Eventi Meteorologici Estremi, Venezia Settembre 2012.

FRONTERO P. (2017), *Clima: Veneto sempre più a rischio*, Libera Università Popolare della Valpolicella.

IPCC Climate Change 2014 Synthesis Report Fifth Assessment Report.

Piano d'azione per la qualità dell'aria per il Comune di Verona e i Comuni dell'area metropolitana limitrofa Ottobre 2011.

PINNA S. (2017), *Lineamenti di Climatologia*, Roma, Casa Editrice Aracne.

PIFFERETTI *et al.* (2017), *La neve nella Pianura Padano-veneta: nuova cartografia 1961-2017*, "Nimbus", 77, pp.64-79.

ROBERT-LUCIANI THIERRY, *Meteorisk - Extreme events workshop*, Arabba 7th – 8th october 2004.

SORMANI MORETTI L. (1904), *La Provincia di Verona: monografia statistica economica-amministrativa*, Firenze, Olschki Editore.

Sitografia

<http://www.meteoam.it> - Tabelle e Grafici Climatici

LORENZO GIOVANNINI*

Previsioni casa per casa: la meteorologia a scala urbana nelle città

RIASSUNTO: Viene presentata una catena meteorologica per la previsione del campo termico nelle aree urbane di Trento e Rovereto. La catena modellistica implementata è composta dal modello meteorologico WRF, che effettua una previsione delle condizioni meteorologiche ad una risoluzione di 1 km, accoppiato ad una parametrizzazione che calcola il bilancio energetico superficiale in ambiente urbano e che fornisce la previsione del campo di temperatura nelle città con una risoluzione di 100 m.

PAROLE CHIAVE: meteorologia urbana, previsioni meteorologiche, canyon urbano, WRF, parametrizzazione urbana.

ABSTRACT: A modelling chain aiming at providing the forecast of the thermal field in the urban areas of Trento and Rovereto is presented. The modelling chain is composed of the meteorological WRF model, with a spatial resolution of 1 km, coupled with an urban parameterization scheme, which evaluates the surface energy balance in the urban area and is able to provide forecasts of the temperature field inside cities with a spatial resolution of 100 m.

KEYWORDS: urban meteorology, weather forecasts, urban canyon, WRF, urban parameterization.

1. INTRODUZIONE

La massiccia urbanizzazione che ha interessato alcune zone del nostro pianeta nello scorso secolo ha reso lo studio della meteorologia urbana sempre più importante, in quanto al giorno d'oggi la maggior parte della popolazione vive all'interno di agglomerati urbani. Numerosi studi hanno evidenziato che le città sono soggette a condizioni climatiche 'alterate' rispetto alle zone rurali circostanti, con la presenza della cosiddetta 'isola di calore urbana' (OKE 1987), che causa temperature più elevate rispetto a quelle presenti nelle zone rurali circostanti. In particolare, l'alterazione del clima urbano è la manifestazione dei cambiamenti diretti ed indiretti prodotti dall'uomo sul bilancio energetico della bassa atmosfera, ossia la parte inferiore della troposfera, quella a diretto contatto con la superficie terrestre. I materiali artificiali e la ridotta presenza di vegetazione riducono fortemente l'evapotraspirazione nelle aree urbane e, come conse-

* Ricercatore presso l'Università di Trento, si occupa di modellistica meteorologica con particolare interesse sui processi a scala urbana.

guenza, una più grande frazione di energia in arrivo dal sole viene convertita in calore sensibile o immagazzinata all'interno delle superfici.

Al giorno d'oggi la possibilità di avere a disposizione risorse computazionali sempre crescenti e a prezzi accessibili consente di spingere le previsioni meteorologiche a risoluzioni molto più elevate di quanto possibile fino a qualche decennio fa. I modelli meteorologici a scala globale effettuano previsioni con passi di griglia dell'ordine di 10 km, mentre le previsioni regionali con modelli a scala locale si spingono a risoluzioni dell'ordine del km. Tutto ciò rende possibile tenere in considerazione nelle simulazioni effettuate con modelli meteorologici gli effetti delle città sulle condizioni meteorologiche alla scala locale.

In questo lavoro viene presentato un sistema di previsioni meteorologiche ad alta risoluzione specificatamente pensato per le aree urbane, applicato alle città di Trento e Rovereto. Nel capitolo 2 vengono introdotti gli strumenti che compongono la catena modellistica, cioè il modello meteorologico Weather Research and Forecasting (da ora WRF) (SKAMAROCK *et al.* 2008) e una parametrizzazione urbana, in grado di valutare il bilancio energetico superficiale all'interno delle aree urbane. Nel capitolo 3 viene presentata la validazione delle previsioni del campo termico nelle aree urbane di Trento e Rovereto, condotta tramite confronto con valori registrati durante due campagne di misura effettuate nelle due città, mentre il capitolo 4 è dedicato alle conclusioni e ai possibili sviluppi futuri del presente lavoro.

2. STRUMENTI E METODOLOGIA

Le simulazioni effettuate con i modelli meteorologici non sono in grado risolvere esplicitamente, a causa dell'eccessivo costo computazionale, le scale spaziali necessarie a tenere in considerazione i processi fisici che influenzano le condizioni termiche all'interno del complesso tessuto urbano. Per superare questa limitazione e riuscire ad effettuare previsioni ad alta risoluzione del campo termico in area urbana è necessario ricorrere a parametrizzazioni che tengano in considerazione in maniera semplificata, ma allo stesso tempo sufficientemente accurata, gli effetti indotti dalle aree urbane sui processi atmosferici. Negli ultimi anni lo sviluppo di questi modelli semplificati ha riscosso un grande interesse nella ricerca scientifica del settore (MASSON 2000; KUSAKA *et al.* 2001; MARTILLI *et al.* 2002; GIOVANNINI *et al.* 2013). Caratteristica di questo tipo di modelli semplificati è la loro economicità computazionale rispetto ai modelli meteorologici completi. Seguendo questi recenti sviluppi della ricerca del settore, nel presente lavoro viene presentato l'accoppiamento tra un modello meteorologico ad area limitata e una parametrizzazione semplificata degli effetti urbani, al fine di produrre previsioni ad alta risoluzione delle condizioni termiche all'interno delle aree urbane. In particolare, la catena modellistica meteorologica previsionale implementata è basata sull'accoppiamento tra il modello meteorologico WRF e

una parametrizzazione per la valutazione degli scambi energetici tra la superficie e l'atmosfera, specificatamente pensata per le aree urbane.

2.1 Il modello meteorologico WRF

Il modello meteorologico WRF è un modello meteorologico prognostico *open-source* allo stato dell'arte, utilizzato sia per scopi operativi, sia per attività di ricerca, continuamente sviluppato dal National Center for Atmospheric Research (NCAR), a Boulder, Colorado. La prima complessità che bisogna affrontare per ottenere previsioni accurate per le città riguarda la simulazione di campi meteorologici affidabili in *input* per lo schema urbano. La realizzazione di simulazioni meteorologiche operative affidabili per un territorio ad orografia complessa come quello in cui si trovano le città di Trento e Rovereto, oggetto del presente lavoro, costituisce, infatti, una delle tematiche di maggior interesse e una delle sfide ancora aperte per la ricerca nel settore. Di conseguenza, il *set-up* modellistico è stato ideato ed in seguito implementato al fine di fornire una previsione meteorologica più accurata possibile in un territorio ad orografia particolarmente complessa come quello della Provincia di Trento. Per questo motivo particolare attenzione è stata dedicata ai *dataset* di orografia ed uso del suolo, per i quali si è deciso di adottare una risoluzione originale di 30 m e 100 m rispettivamente, ben superiore a quella che sarebbe disponibile di *default* per il modello WRF. La classificazione di uso del suolo è basata sul *dataset* europeo Corine, rimappato in modo da essere compatibile con le categorie di uso del suolo di WRF. La catena modellistico- previsionale implementata utilizza come condizione iniziale e al contorno le previsioni del modello a scala globale Global Forecast System (GFS), con una risoluzione di circa 25 km, sono rese liberamente fruibili dal National Centers for Environmental Prediction (NCEP). Le previsioni meteorologiche con il modello WRF sfruttano la tecnica dei 'domini innestati', nella quale domini a risoluzione crescente vengono innestati all'interno di domini più grandi e con risoluzione minore, che forniscono le condizioni al contorno. Per il presente progetto si è deciso di utilizzare 3 domini, con una risoluzione di 9, 3 e 1 km rispettivamente (vedi figura 1). Il dominio con risoluzione di 1 km copre l'area di interesse, cioè la Provincia di Trento e di Vicenza, parte della Provincia di Verona, Brescia, Mantova, Padova, Belluno, Treviso e Bolzano. Tale risoluzione consente di risolvere nel dettaglio la situazione meteorologica anche in un territorio ad orografia complessa e permette di fornire condizioni al contorno accurate alla parametrizzazione urbana. Inoltre, al fine di migliorare i risultati delle previsioni effettuate con il modello meteorologico WRF, si è deciso di assimilare all'interno del dominio con risoluzione di 1 km i dati delle stazioni di Meteotrentino, della Fondazione Edmund Mach e del Servizio Meteorologico della Provincia Autonoma di Bolzano. L'inclusione dei dati misurati dalle stazioni al suolo è infatti fondamentale per ottenere delle condizioni iniziali accurate nel dominio a più alta risoluzione. Questo perché le condizioni

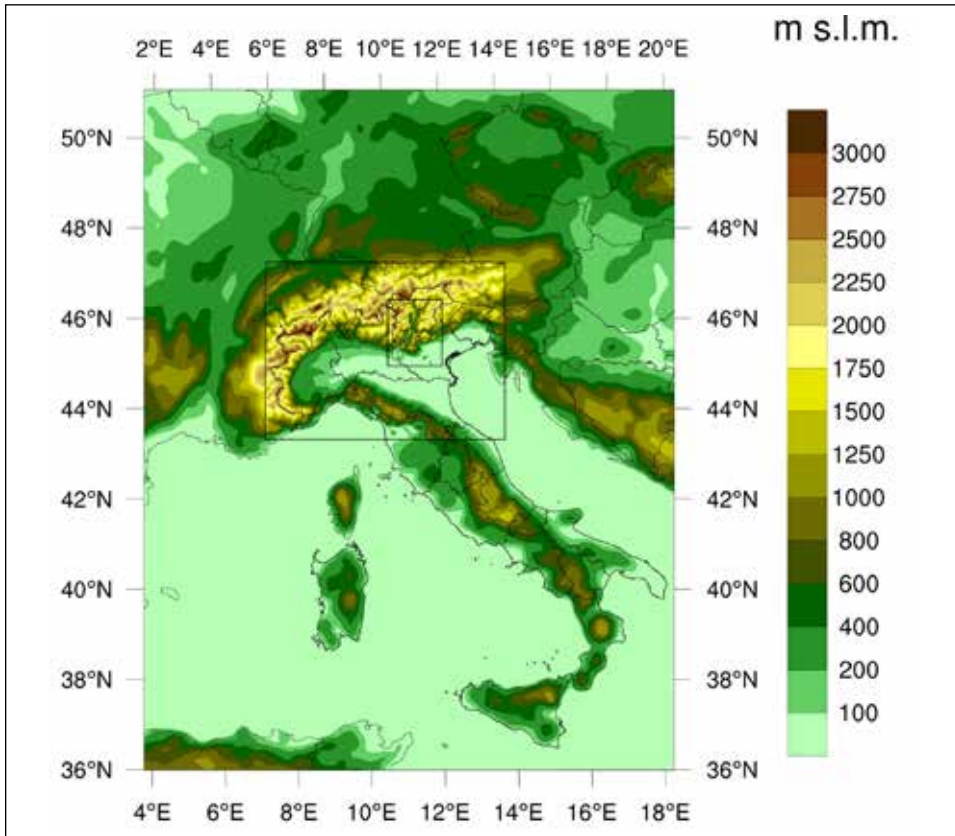


Figura 1. Domini innestati utilizzati per le previsioni con il modello meteorologico WRF.

iniziali fornite dal modello a scala globale, con una risoluzione orizzontale di 25 km, non sono in grado di descrivere nel dettaglio le condizioni meteorologiche in un territorio ad orografia complessa come quello della Provincia di Trento. Si è notato che queste problematiche sono particolarmente presenti nel periodo invernale, quando il modello, nella sua configurazione standard, non è in grado di prevedere la formazione dell'inversione termica nei fondovalle.

2.2 La parametrizzazione urbana

La parametrizzazione urbana utilizzata nel presente lavoro si basa, come altri simili esempi presenti in letteratura (MASSON 2000, KUSAKA 2001, MARTILLI 2002), sulla risoluzione del bilancio energetico superficiale all'interno di un canyon urbano. Il canyon urbano è l'unità base con cui si può modellare la complessa geometria urbana. È formato dallo spazio compreso tra due edifici posti uno di fronte all'altro; è delimitato lateralmente dalle superfici solide dei muri, inferiormente da quella della strada e superiormente da una superficie fittizia posta al livello dei tetti. Il parametro geometrico fondamentale che lo caratterizza è il rapporto di

forma (*aspect ratio*), cioè il rapporto tra l'altezza media degli edifici e la larghezza del canyon. Il canyon è composto da tre diversi tipi di superficie: muro, strada e tetto. Ognuna di queste è suddivisa in quattro *layer* di spessore variabile, in modo da poter simulare il comportamento di superfici formate da strati di materiale diverso. La temperatura di ciascuno strato viene calcolata attraverso la risoluzione dell'equazione monodimensionale di condizione del calore attraverso la superficie di interesse. Per il calcolo della temperatura dell'aria nei canyon la parametrizzazione urbana inoltre tiene in considerazione l'ombreggiamento e le riflessioni multiple di radiazione ad onda lunga e ad onda corta che avvengono all'interno del canyon stesso (per maggiori dettagli vedi: GIOVANNINI 2012). Le caratteristiche geometriche del canyon urbano

(larghezza della strada ed altezza degli edifici) vengono fornite in *input* alla parametrizzazione urbana sulla base di alcuni *dataset* di morfologia urbana ottenuti a partire dall'analisi dei dati lidar di elevazione delle superfici (DSM) e di elevazione del terreno (dtm), aventi risoluzione orizzontale di 1 m e verticale di 0.15 m, liberamente scaricabili dal portale geocartografico della Provincia Autonoma di Trento. In questo modo ogni cella del modello urbano, avente risoluzione di 100 m, è caratterizzata da un canyon urbano di riferimento, avente come dimensioni geometriche altezza e larghezza media dei canyon urbani presenti in quell'area della città. In questo modo è possibile tenere in considerazione, seppur in maniera semplificata, la variabilità microclimatica presente all'interno delle aree urbane associate alla variabilità morfologica della città. Nella figura 2 viene riportato il *dataset* di altezza degli edifici relativo alla città di Trento utilizzato nel presente lavoro.

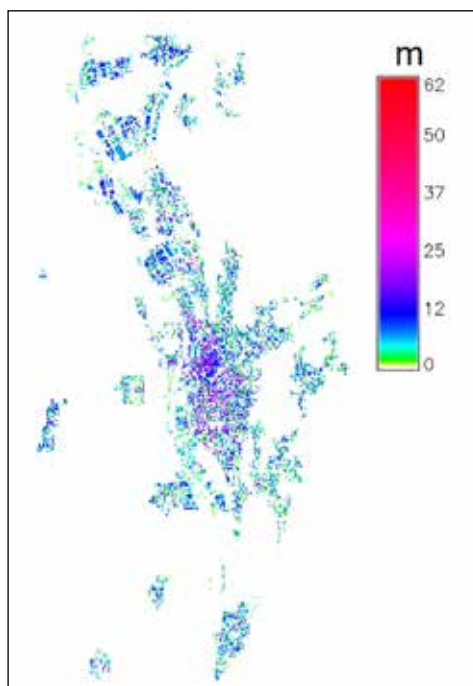


Figura 2. Altezza delle superfici nell'area urbana di Trento, ottenuta dai dati lidar del portale geocartografico della Provincia Autonoma di Trento.

3. VALIDAZIONE DELLE PREVISIONI METEOROLOGICHE A SCALA URBANA

Le mappe di previsione ottenute a partire dagli *output* della catena modellistica descritta nel paragrafo 2 sono rese liberamente disponibili sul sito del progetto (sites.google.com/site/trentinowater).

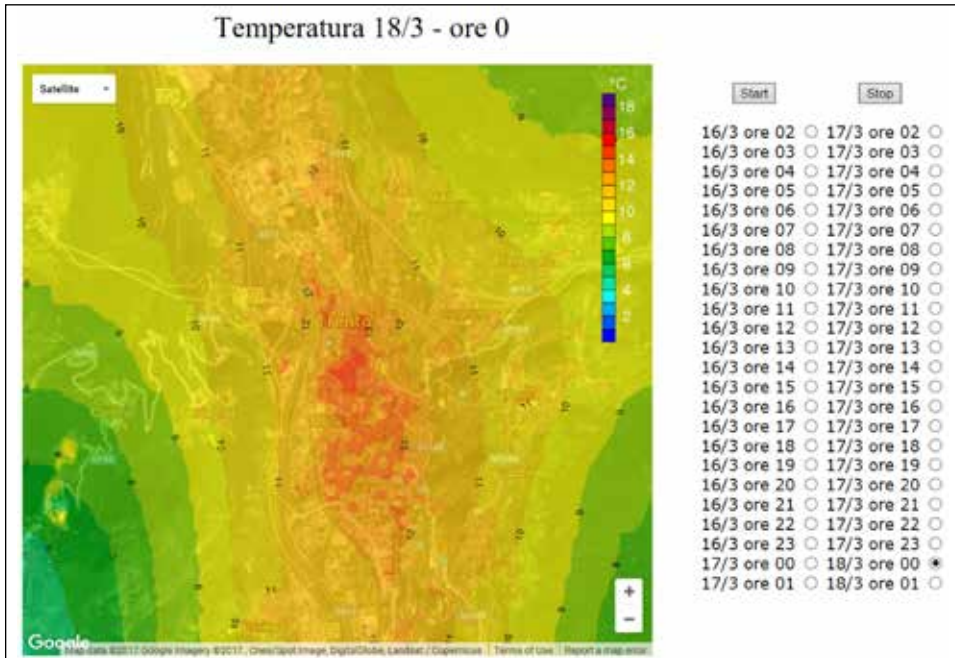


Figura 3. Campo termico simulato dalla catena modellistica nell'area urbana di Trento per le ore 00 LST del 18 marzo 2017.

Nella figura 3 viene mostrato, come esempio, il campo termico calcolato dalla parametrizzazione urbana alle ore 00 LST del 18 marzo 2017. È possibile notare come il modello sia in grado di prevedere la formazione dell'isola di calore urbana, con temperature superiori nel centro città rispetto alle zone circostanti.

L'accuratezza delle previsioni meteorologiche prodotte dalla catena modellistica presentata è stata valutata in maniera estensiva tramite il confronto con le misure sperimentali ottenute durante due campagne di misura effettuate nelle aree urbane di Trento e Rovereto durante l'estate 2016. In questo modo è stato possibile testare e validare in maniera accurata il campo di temperatura simulato dalla catena modellistica all'interno delle aree urbane. I risultati della validazione dei risultati della catena modellistica sono riportati nella figura 4. In particolare in questa figura vengono mostrati i cicli diurni medi dell'isola di calore urbana misurati durante l'estate 2016 e simulati dalla catena modellistica in quattro aree della città di Trento caratterizzate da condizioni morfologiche diverse: a) centro città, b) zona residenziale, c) zona industriale, d) periferia. In particolare l'isola di calore è stata valutata come la differenza di temperatura tra l'area in esame e la campagna circostante la città. La validazione degli *output* della catena modellistica ha evidenziato come le previsioni del campo termico nelle aree urbane di Trento e Rovereto sia in generale accurata, soprattutto per quanto riguarda la valutazione dell'intensità dell'isola di calore durante le ore notturne. Qualche pro-

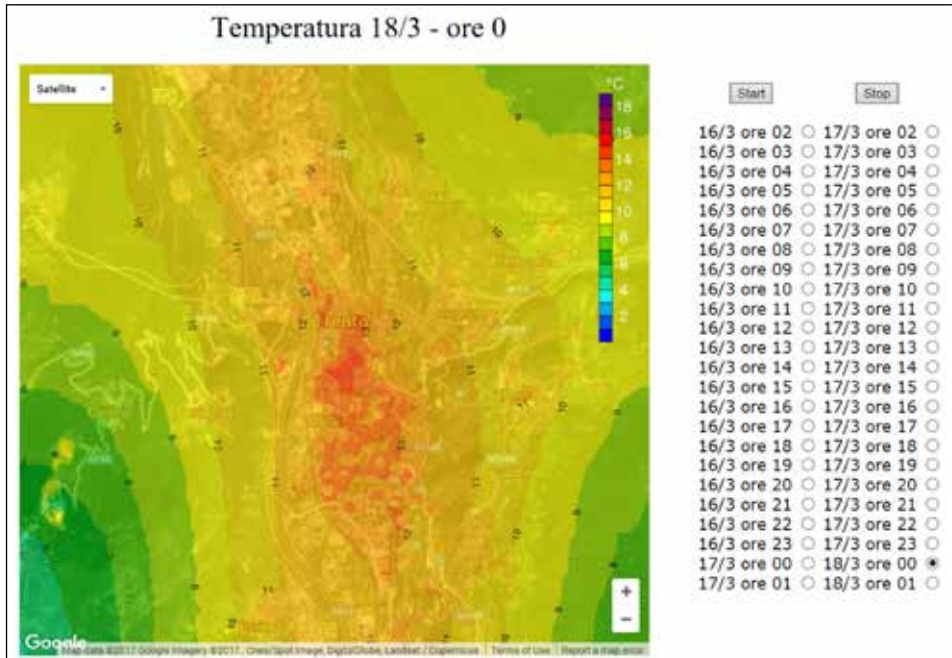


Figura 4. Cicli dell'isola di calore misurati durante l'estate 2016 e simulati dalla catena modellistica. L'isola di calore viene valutata come la differenza di temperatura tra l'area in esame e la campagna circostante la città. a) centro città, b) zona residenziale, c) zona industriale, d) periferia.

blema maggiore è stato invece generalmente riscontrato durante le ore diurne, quando la parametrizzazione urbana tende a sovrastimare le differenze termiche tra aree urbane e aree rurali, soprattutto per quanto riguarda la zona industriale. È possibile notare come l'isola di calore sia un fenomeno che avviene prettamente nelle ore notturne, quando le differenze di temperatura tra la città e le aree rurali è significativa. Inoltre, l'intensità notturna dell'isola di calore è maggiore nel centro città, dove raggiunge valori dell'ordine di 5°C , e meno intensa nelle aree meno urbanizzate, fino a diventare quasi trascurabile in periferia.

4. CONCLUSIONI

In questo lavoro è stata presentata una catena modellistica operativa composta dal modello meteorologico Weather Research and Forecasting (WRF) e da una parametrizzazione che calcola gli scambi energetici tra il tessuto urbano e l'atmosfera, che ha lo scopo di effettuare simulazioni ad altissima risoluzione (100 m) del campo termico all'interno delle aree urbane. I risultati di queste previsioni, che sono resi disponibili giornalmente sul sito sites.google.com/site/trentinoweahter, sono stati verificati e validati tramite confronto con misure di temperatura effettuate nelle aree urbane di Trento e Rovereto. La validazione ha

evidenziato come la catena modellistica sia in grado di simulare con buona accuratezza lo sviluppo dell'isola di calore urbana, soprattutto durante le ore notturne. Inoltre, la parametrizzazione urbana è in grado di catturare le variabilità microclimatiche presenti in diverse zone della città, caratterizzate da diversa morfologia e intensità di urbanizzazione.

La realizzazione e la validazione di questa catena modellistica ha consentito di comprendere in maniera più approfondita i processi fisici che influenzano le condizioni microclimatiche all'interno delle aree urbane e i fattori che intervengono sulla loro variabilità spazio-temporale. Tali informazioni potranno essere utili non solo per la previsione del campo termico nelle aree urbane, ma anche per diverse applicazioni in discipline ingegneristiche che si occupano della scelta dei materiali edilizi di costruzione, dell'ottimizzazione dei consumi energetici degli edifici, della pianificazione dell'uso dell'energia e della progettazione degli spazi urbani. Ad esempio attualmente la stima del fabbisogno energetico di edifici posti in aree urbane avviene generalmente utilizzando informazioni climatiche provenienti da stazioni meteorologiche che sono poste in zone extra-urbane. Questo fatto porta inevitabilmente ad inesattezze nella stima del fabbisogno energetico, non tenendo in considerazione le modificazioni delle condizioni meteorologiche causate dalle aree urbane.

Ringraziamenti

Il presente lavoro è stato finanziato dalla Fondazione Cassa di Risparmio di Trento e Rovereto nell'ambito del progetto "Previsione ad alta risoluzione delle condizioni di comfort termico nelle principali aree urbane della Provincia di Trento".

Si ringraziano l'ing. Fabio Zecchini e l'ing. Michele Gasperotti per aver contribuito alla realizzazione delle campagne di misure nelle aree urbane di Trento e Rovereto.

Bibliografia

- GIOVANNINI L. (2012), *Urban scale phenomena and boundary layer processes in mountain valleys*. Trento, Scuola di Dottorato in Ingegneria Ambientale, Università di Trento, Trento.
- GIOVANNINI L., ZARDI D., DE FRANCESCHI M. (2013), *Characterization of the thermal structure inside an urban canyon: field measurements and validation of a simple model*, "Journal of Applied Meteorology and Climatology", 52, pp. 64-81.
- KUSAKA H., KONDO H., KINEGAWA Y., KIMURA F. (2001), *A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: comparison with multi-layer and slab models*, "Boundary-Layer Meteorology", 101, pp. 329-358.
- MARTILLI A., CLAPPIER A., ROTACH M.W. (2002), *An urban surface exchange parameterisation for mesoscale models*, "Boundary-Layer Meteorology", 104, pp. 261-304.
- MASSON V. (2000), *A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models*, "Boundary-Layer Meteorology", 94, pp. 357-397.
- OKE T.R. (1987), *Boundary Layer Climates*, London, Routledge.
- SKAMAROCK W.C., KLEMP J.B., DUDHIA J., GILL D.O., BARKER D.M., DUDA M.G., HUANG X.-Y., WANG W., POWERS J.G. (2008), *A description of the advanced research WRF version 3*. Boulder, NCAR Technical Note TN-475+STR.

ANDREA PIAZZA*

La necessità di elaborare previsioni meteo diverse per utenti diversi (agricoltura, viabilità, protezione civile ecc.)

RIASSUNTO: Oggi le previsioni meteo, grazie allo sviluppo tecnologico, hanno un'affidabilità ed una diffusione come mai prima d'ora. Ma se da un lato la previsione meteo è diventata sempre più precisa ed accessibile (smartphone), dall'altro è ancora difficile comunicare l'incertezza della previsione meteo in modo che i diversi utenti possano utilizzarla con vantaggio. È quindi necessario elaborare previsioni meteo diverse per utenti diversi: l'icona meteo, nel caso di previsione di pioggia notturna, non può essere la stessa per gli agricoltori e per i turisti.

PAROLE CHIAVE: Meteorologia, previsione, tecnologia, progresso, probabilità.

ABSTRACT: Today weather forecast thanks to the technological development, have a reliability and a diffusion like never before. But while the weather forecast has become more and more precise and accessible (smartphone), on the other it is still difficult to communicate the uncertainty of the weather forecast so that different users can use it in the best way. It is therefore necessary to develop different weather forecasts for different users: the weather icon, in case of night rain forecast, can not be the same for farmers and tourists.

KEYWORDS: Meteorology, forecasting, technology, progress, probability.

Le previsioni meteo 'sinottiche' sono state possibili solo dopo l'invenzione del telegrafo che permise di conoscere in tempi brevissimi le osservazioni di luoghi distanti e quindi tracciare le carte del tempo con isobare, isallobare, isoterme ecc. Prima del telegrafo le previsioni venivano effettuate solo con l'osservazione dei parametri meteo, *in primis* la pressione atmosferica e la sua variazione nel tempo, del luogo dove veniva fatta la previsione che ovviamente era valida solo per il luogo stesso e limitata generalmente a meno di 12-24 ore. Fu però con l'invenzione della radio e dei computer che le previsioni meteo cominciarono ad essere elaborate come le conosciamo oggi. Con la radio(sonda) si poterono conoscere i parametri meteo a diverse quote e con i computer si poté iniziare a simulare il moto atmosferico ed i suoi processi fisici. È passato quindi solo poco più di mezzo secolo dalla prime previsioni numeriche e una quarantina d'anni dalle prime moviole satellitari che permisero di osservare il movimento delle nubi dall'alto. Le previsioni meteo, una volta elaborate, venivano poi diffuse da radio e giornali. Per ovvie ragioni, le previsioni sui giornali erano già vecchie quando venivano lette a causa dei tempi

* Previsore di Meteotrentino, Provincia autonoma di Trento.

di stampa e di distribuzione. Con internet il mondo delle previsioni cambiò: se prima c'erano gli appuntamenti fissi con radio e tv oppure sui quotidiani, poi, con il web, le previsioni si poterono consultare in modo continuativo ed anche le previsioni modellistiche poterono essere consultate appena prodotte. Ma questa è storia molto recente poiché ciò è possibile solo da una ventina d'anni.

Negli ultimi anni gli smartphone hanno rivoluzionato ancora, e in meglio, il settore previsionale avendo permesso di avere sempre con noi tutte le informazioni che si avevano sul computer. Gli smartphone offrono un'opportunità impensabile fino a qualche anno fa e cioè la possibilità di visualizzare i monitoraggi, in particolare immagini radar e da satellite, da moltissimi utenti nei posti più disparati. Le previsioni *nowcasting*, che fino a pochi anni fa venivano utilizzate praticamente solo dai piloti di aereo, la protezione civile e pochi altri, oggi sono potenzialmente utilizzabili da tutti. In particolare le moviole satellitari e radar che possiamo osservare dal nostro smartphone permettono potenzialmente a ciascuno di noi di elaborare previsioni *nowcasting*.

Oggi la maggioranza delle persone consulta le previsioni meteo sul proprio smartphone. Ma il possessore dello smartphone non sa che le previsioni meteo che sono visualizzate sul suo schermo sono prodotte utilizzando generalmente le previsioni numeriche del modello americano GFS da qualche azienda meteo che ha preinstallato una app grazie ad un accordo col fabbricante. Solo gli utenti più attenti cercano le previsioni diverse da quelle 'del cellulare' su altri siti internet pubblici o privati. Inoltre le previsioni meteo ci vengono proposte quasi esclusivamente per simboli che sono molto più immediati da leggere delle parole ma ovviamente meno esaustivi. Ad esempio, l'icona del sole con la nuvola può avere il significato di tempo soleggiato al mattino e nuvoloso al pomeriggio ma anche il contrario, oppure può simboleggiare una variabilità difficile da prevedere nel dettaglio. Inoltre le temperature massime e minime sono spesso visualizzate con precisione al decimo di grado il che ci dà un'idea (errata) di precisione, mentre in realtà un utente attento osserverebbe quotidianamente differenze anche di diversi gradi tra il reale ed il previsto, ma siamo distratti e poco interessati alla verifica delle previsioni del nostro smartphone che consideriamo molto affidabile.

È chiaro quindi che un centro meteo che disponga di finanziamenti limitati non può competere con i siti privati che offrono tutto ciò che la gente chiede: previsioni con dettaglio orario sulla nostra città (addirittura sui diversi quartieri di Roma), a lungo termine fino a 30 giorni o addirittura qualcuno fino a 3 mesi. Ma se i computer oggi sono in grado di elaborare le previsioni con elevatissimo dettaglio spaziotemporale ha senso ancora il previsore meteo? Se chiediamo al meteorologo di elaborare previsioni generiche con elevato dettaglio spaziotemporale ovviamente la battaglia è persa ed i computer stravinceranno, ma se invece al previsore meteo chiediamo di aiutare le persone a prendere decisioni, allora saranno i computer ad essere perdenti. La previsione meteo infatti ha valore solo quando determina una scelta dell'utente. Se l'utente non si fida della pre-

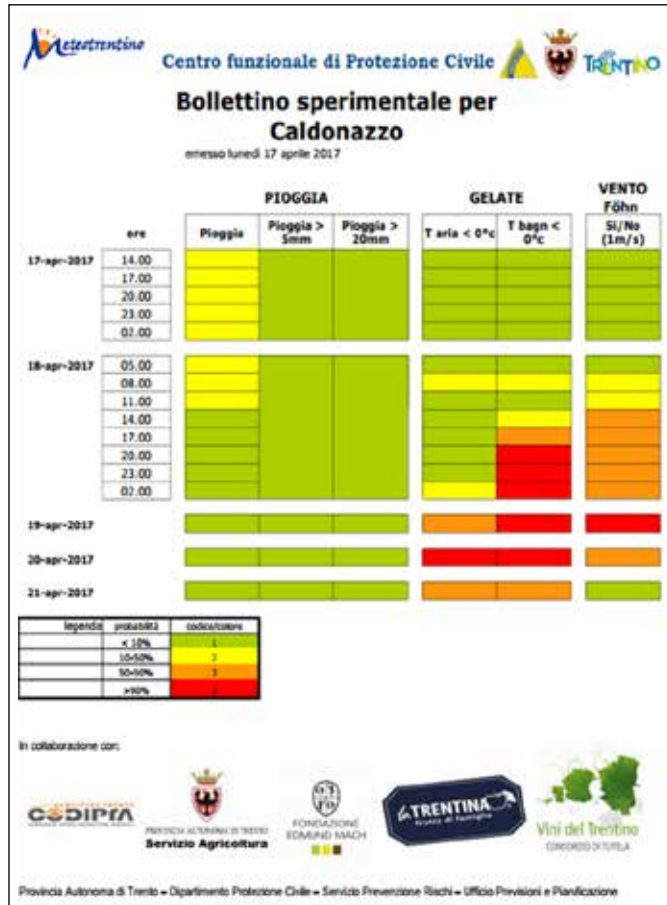


Tabella 1. Bollettino probabilistico sperimentale per l'agricoltura di meteotrentino. (<https://www.meteo-trentino.it/#!/content?menuItemDesktop=70>).

visione meteo e prenderà le decisioni indipendentemente da questa, allora tutti gli sforzi, gli investimenti ed il lavoro del previsore saranno senza valore. Per elaborare previsioni meteo utili bisogna prima di tutto conoscere le scelte possibili dell'utente, il costo del danno che subisce se si verifica un evento avverso (ad esempio piogge abbondanti) ed il costo delle eventuali attività di prevenzione.

Il previsore meteo, oltre ad essere in grado di formulare una previsione, è in grado di valutare l'affidabilità della stessa ed in particolare la probabilità di superare una predefinita soglia. Negli ultimi anni si sono quindi sviluppati prodotti previsionali, concordati con l'utente, che indicano la probabilità di superare una determinata soglia (di precipitazione, vento, temperatura ecc). Tali prodotti sono molto più apprezzati della previsione deterministica in quanto permettono all'utente di valutare quanto sia affidabile la previsione. Le autostrade sono interessate alla probabilità di neve e formazione di ghiaccio, i gestori dei bacini idroelettrici alla previsione di precipitazioni abbondanti, gli agricoltori prevalentemente alla previsione di temperature e pioggia.

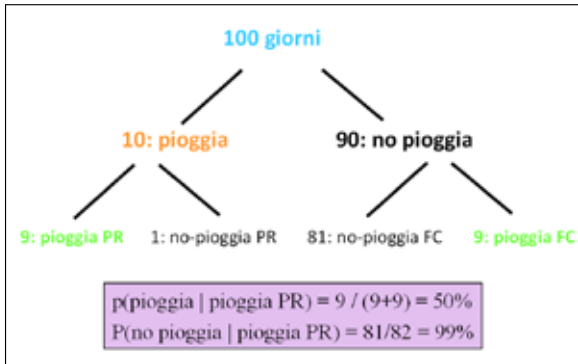


Tabella 2. Immaginiamo di vivere in un luogo dove mediamente piove 10 giorni su 100 e di disporre di un modello previsionale che abbia un'affidabilità del 90%. La probabilità che domani piova quando il modello prevede pioggia è del 50% mentre se il modello prevede assenza di pioggia l'affidabilità sarà del 99%.

La maggior parte dei siti meteo indicheranno quanti millimetri di pioggia cadranno e in che ore mentre il previsore ci dirà quanto è probabile una pioggia superiore, ad esempio, a 5 mm. Starà poi a noi decidere se irrigare o meno. La previsione meteo inoltre ha valore solo quando il rapporto tra il costo delle attività di prevenzione e il danno subito in assenza di prevenzione è compreso in un certo intervallo. Limitando l'analisi al caso in cui la prevenzione sia inferiore al costo del danno è chiaro che in caso di uguaglianza tra costo della prevenzione e costo del danno la previsione sarà inutile in quanto sarà sempre svantaggioso fare prevenzione con previsioni che per loro natura sono incerte. Anche nel caso in cui il costo del danno sia molto elevato, mentre il costo della prevenzione sia molto basso, la previsione sarà inutile in quanto converrà fare la prevenzione sempre. È solo nei casi intermedi che vale la pena utilizzare le previsioni meteo.

Per capire questo concetto supponiamo di elaborare previsioni di gelate e che il costo della prevenzione sia quello di restare svegli di notte in modo da poter accendere l'impianto antibrina. Supponiamo quindi che il costo di una notte svegli sia di 150 euro. Se il costo del danno che subirà sarà il guadagno di un anno, nel periodo a rischio gelate ci sarà sempre qualcuno pronto ad attivare gli impianti e le previsioni meteo saranno di fatto inutili perché non cambieranno l'organizzazione degli agricoltori. Se invece ho solo un melo nel giardino di casa, anche se la previsione di gelo sarà elevata non starò certo sveglio: la pianta quell'anno non farà frutti ed io comprerò le due casse di mele che avrebbe prodotto. La previsione meteo delle gelate sarà utile quindi solo a quanti, da un'eventuale gelata, subirebbero un danno non troppo superiore al costo della prevenzione. Purtroppo decidere tenendo conto dell'incertezza è più faticoso che con le previsioni deterministiche e quindi l'utente medio preferisce, ancora oggi, la previsione deterministica anche se il valore aggiunto della previsione probabilistica è molto elevato.

Supponiamo, ad esempio, di essere interessati ad irrigare il giardino. In assenza di precipitazioni irrighiamo per mezz'ora al giorno. Siamo quindi interessati a sapere se il giorno dopo poverà. A volte si può prevedere con estrema affidabilità che la giornata successiva sarà asciutta o molto piovosa, ma in altre giornate, soprattutto in estate, la previsione sarà spesso incerta. Le previsioni automatiche che consultiamo sul cellulare o nella mag-

FRANCESCO DOMENICHINI*

Il valore delle previsioni meteorologiche

RIASSUNTO: Uno degli obiettivi attuali della meteorologia è mettere al corrente l'utente, sia generico che specializzato, dei limiti e delle potenzialità della previsione meteorologica. La letteratura del campo della meteorologia moderna spesso tratta anche della verifica della previsione, come argomento specifico, inclusa l'esposizione dell'approccio *Cost/Loss*; questo aspetto completa la valutazione che si ottiene con gli indici di verifica, ponendo anche l'attenzione sul valore (economico o concettuale) di una previsione. Un punto centrale è che ogni previsione può dare risultati errati, falsi allarmi o mancati allarmi, ma questa intrinseca caratteristica non ne annulla il valore. Un costrutto completo per l'utilizzo operativo di una previsione consiste nell'individuare un fenomeno meteorologico specifico, un sistema di prevenzione dei danni, una previsione con performance nota, oltre ad una stima dei costi del sistema di protezione (*Cost*) e dei danni potenziali (*Loss*). Da qui si può calcolare quindi l'effettivo valore di una previsione, ovvero la capacità di essere guidati verso scelte migliori.

PAROLE CHIAVE: errori di previsione, verifica della previsione, valore della previsione, modello costo/perdita, tabella di contingenza.

ABSTRACT: One of the most actual aims of the meteorology is to make aware the user, the general as the specialized, of the limits and the potentialities of the meteorological forecast. The literature in the field of the modern meteorology often comprehend treatise on the Forecast Verification, as a specific topic, including the explanation of the Cost/Loss approach; this approach makes more complete the evaluation obtained by the common verification indexes, focusing also on the Value (economical or conceptual) of a forecast. A central point is that any forecast cause bad issues, false alarm and misses alarm, but this inherent feature does not nullify the value of the forecast. A complete framework aimed to the operational employment of a forecast require to individuate a specific meteorological event, a prevention system, a forecast with known performance, and moreover an estimation of the cost of the prevention (Cost) and the potential damage (Loss). From that framework we can estimate the value of a forecast, that is the ability to help user to make good decisions.

KEYWORDS: forecast error, forecast verification, forecast value, cost/loss model, contingency table.

1. SISTEMI PREVISIONALI E VERIFICA

I fenomeni meteorologici sono oggetto di previsione scientifica da almeno un secolo. Queste previsioni si sono dimostrate via via più efficaci grazie all'impiego di strumenti di calcolo sempre più potenti, fino ai moderni modelli meteoro-

* Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto - Servizio Meteorologico, Centro Meteorologico di Teolo, via Marconi 55 Teolo (PD) 35137, Italia.

logici che lavorano su diverse scale dimensionali. La previsione ha delle affinità con l'esperimento scientifico, ovvero data una condizione iniziale si ipotizza che avverrà una determinata configurazione in futuro. Questo esperimento non può essere completo se non verifico i risultati confrontandoli con la realtà. La qualità delle previsioni e i loro progressi sono stimati con metodi sistematici che complessivamente costituiscono una disciplina detta 'verifica delle previsioni'; da oltre vent'anni la verifica delle previsioni costituisce un punto chiave della disciplina previsionale stessa.

Complessivamente ci sono 3 motivi importanti per procedere con la verifica delle previsioni: controllare la qualità della previsione, migliorare la qualità della previsione, confrontare la qualità di previsioni diverse.

Conoscere la qualità della previsione ci permette di stabilirne il valore.

1.1. La verifica delle previsioni

Esistono molti tipi di previsione, e questo porta a diversi tipi di verifica.

La prima suddivisione è sulla natura della previsione: deterministica, probabilistica, qualitativa. Altra suddivisione riguarda il dominio spazio-temporale: serie temporali, distribuzione spaziale, accorpamenti spazio-temporali.

Infine, l'oggetto prodotto dalla previsione: dicotomica, multicategoriale, continua, orientata all'oggetto o all'evento.

Una volta individuata la natura e l'oggetto della previsione, si può definire il tipo di verifica opportuna. Per l'applicazione, a cui siamo interessati, l'analisi del valore della previsione è un buon punto di partenza e consiste nel ridurre la situazione considerata in due sole casistiche: evento o non evento. Questa divisione netta può essere applicata anche a situazioni non semplici, fissando delle soglie opportune. Questo approccio implica la verifica mirata alla previsione dicotomica.

1.2. Metodi di verifica per previsione dicotomica

Questo tipo di previsione deve essere espressa sotto forma di un predicato semplice, che descrive un evento che può essere previsto o non previsto e verificato o non verificato.

Per ogni evento e per ogni previsione realizzata per un periodo sufficiente a creare una statistica, si può compilare uno schema di verifica, classificando i risultati caso per caso. Per ogni caso si ha quindi una coppia previsto-osservato. La verifica considererà una serie N di casi, che andranno a popolare una tabella a 4 caselle, detta "tabella di contingenza" (vedi tabella 1).

Le colonne della tabella indicano l'occorrenza o meno dell'evento:

E = l'evento è stato osservato

NE = l'evento non è stato osservato

Le righe indicano la previsione o meno del fenomeno:

F = l'evento è stato previsto

NF = l'evento non è stato previsto

I casi in questo quadro vengono suddivisi in 4 tipi, distribuiti nelle 4 caselle della tabella di contingenza:

a - numero di eventi correttamente previsti ed osservati, HITS

b - numero di eventi previsti ma non osservati, FALSE ALARMS

c - numero di eventi non previsti ma osservati, MISSES

d - numero di eventi correttamente non previsti e non osservati, CORRECT NEGATIVES

	E	NE
F	a	b
NF	c	d

Tabella 1. Tabella di contingenza

Combinando i numeri raccolti in questi 4 tipi di risultato si possono ricavare diversi indici della qualità della previsione, ciascuno adatto a mettere in rilievo aspetti della previsione.

1.3. Indici di valutazione della previsione

Dalla tabella di contingenza si possono ricavare una serie di indici:

accuracy =	$(a + d) / N$
bias =	$(a + b) / (a + c)$
pod = probability of detection =	$a / (a + c)$
far = false alarm ratio =	$b / (a + b)$
sr = success ratio =	$a / (a + b)$
pofd = probability of false detection =	$b / (b + d)$
ts = treath score =	$a / (a + b + c)$
HK discriminant =	$pod - pofd$
NOTA: $N=a+b+c+d$	

Questo elenco di indici, comunemente utilizzati nella verifica non è completo. Ciascun indice evidenzia alcuni aspetti della qualità della previsione. Di utilizzo molto comune sono *bias* e *accuracy*, benchè essi da soli non siano sufficienti, anche con valori ottimali, a descrivere un quadro completo della previsione oggetto di verifica.

Nella tabella 2 si vede un caso di previsione con *bias* e *accuracy* ottimi, nonostante il numero di falsi o di mancati allarmi sia identico alle previsioni corrette.

	E	NE
F	1	1
NF	1	997

Tabella 2. Tabella di contingenza ipotetica per una previsione di evento raro: bias e accuracy sono pressochè ideali, ma sia i falsi che i mancati allarmi sono uguali numericamente alle previsioni giuste.

2. DALLA VERIFICA AL VALORE DELLE PREVISIONI

2.1. *Qualità e valore*

Secondo le linee guida sul tema della verifica, si distinguono 3 tipi di bontà (*goodness*) della previsione:

- consistenza – il grado con cui la previsione si avvicina alla migliore valutazione della situazione da parte del previsore;
- qualità – il grado con cui la previsione si avvicina a ciò che è realmente accaduto;
- valore – il grado con cui la previsione aiuta un utilizzatore a prendere una decisione utile in senso economico o di qualche altra forma di benefit.

Nel primo capitolo abbiamo visto brevemente delle stime della qualità della previsione. Il valore è un aspetto diverso della previsione; una previsione può essere qualitativamente non impeccabile ma avere un valore, mentre previsioni di elevata qualità possono rivelarsi di scarso valore.

Un punto cruciale è che il sistema previsionale esprime un valore nel momento in cui esiste un sistema di prevenzione (o altra forma di intervento) che viene applicata in base alla previsione. Per stimare il valore di una previsione, quindi, non ci si limita solo a confrontare la previsione con la realtà osservata, ma si applicano i risultati ad una condizione reale in cui, un decisore, compie delle azioni in conseguenza della previsione ricevuta.

2.2. *Costo della prevenzione C, ed entità del danno L*

In generale, il valore della previsione viene stimato considerando i costi di un metodo di protezione e paragonandoli al costo dei danni prodotti dall'evento oggetto di previsione.

Il sistema di protezione che consideriamo nel nostro quadro è un costo 'dinamico', ovvero deve costare in funzione della scelta che un operatore compie in base alla previsione; questo implica che il costo sia speso di volta in volta, e dovrebbe escludere metodi di protezione sistemici che implicino un investimento che risolve o attenua definitivamente il problema. In quest'ottica, il sistema di prevenzione avrà un costo C dovuto alle azioni di intervento che vengono applicate in vista dell'evento (collocare sacchi di sabbia, attivare operatori di protezione civile, spostare beni materiali, evacuare abitanti...).

Altrettanto si deve produrre un conteggio dei danni potenzialmente prodotti dall'evento, indicando con L questa stima. In generale L sarà un costo medio, piuttosto che massimale, per rendere valide le valutazioni seguenti.

2.3. *Costi senza previsione*

Nel quadro impostato al capitolo precedente, se un determinato evento si verifica e il sistema di protezione non è stato attivato, i danni che si verificano sono mediamente pari ad L; se, invece, si è attivato il meccanismo di protezione i costi

sono C e i danni ipoteticamente sono ridotti a 0. Nell'ipotesi che non esista un sistema di previsione, ma solo un sistema di protezione, posso confrontare i costi dell'attivazione in ogni situazione del sistema di protezione con il costo dei danni prodotti dall'evento, nella sua frequenza di accadimento naturale (probabilità = p): sia N il numero totale dei casi considerati sia p la probabilità del verificarsi dell'evento ($p < 1$).

$N * p$ è il numero di casi in cui si è verificato l'evento.

Il costo a cui vado incontro se attivo sempre il mio sistema di protezione è:

$C * N$ (costo assoluto della protezione) caso A.

La spesa dovuta ai danni nel caso in cui io non abbia (o non usi) un sistema di protezione è:

$L * N * p$ (danno climatologico) caso B.

È immediato osservare che un sistema di protezione è conveniente se

$C * N < L * N * p$ ovvero se $C/L < p$.

Il fattore C/L è determinante nel problema della scelta delle spese di protezione.

L'interpretazione di queste formule è la seguente:

- se C/L è inferiore alla probabilità del fenomeno conviene proteggere sempre;
- se C/L è superiore alla probabilità del fenomeno conviene subire i danni.

Vedremo in seguito che, in genere, è possibile ridurre il problema da due parametri C ed L al solo parametro C/L .

Nella figura 1 si riporta una rappresentazione grafica di quanto appena visto. Si noti che in tutto questo non è stato considerato l'utilizzo di una previsione che ci aiuti a scegliere se applicare la protezione; proteggere significa spendere il costo C a priori per ogni caso e C moltiplicato per il numero di casi va a costituire il costo assoluto della protezione. Questo approccio può essere esteso a situazioni di investimento/ammortamento.

Nel caso in cui si possa porre in essere una protezione che resti efficiente per N casi e del costo complessivo K , allora si può procedere allo stesso ragionamento impiegando $C = K/N$ (possiamo indicare C come un'unità di ammortamento).

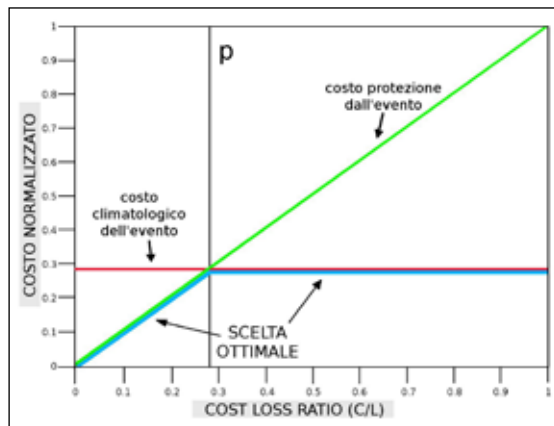


Figura 1. Nelle ordinate si riporta il costo normalizzato su N e su L ; la linea diagonale identica è il costo assoluto per la protezione (cresce con C), e l'orizzontale rossa è il danno climatologico; al variare di C/L la scelta più conveniente cadrà sulla scelta più conveniente delle due, a seconda del valore C/L (ascissa). La scelta migliore cambia quando C/L eguaglia la p dell'evento

2.4 Costi con previsione e valore della previsione

Nel caso si abbia a disposizione un sistema di previsione dell'evento da cui proteggerci, il quadro dei costi e delle scelte operabili diventa un po' più complesso.

In particolare, poniamo l'ipotesi che il sistema previsionale sia dicotomico e sia disponibile una tabella di contingenza che descrive i risultati del sistema previsionale; facciamo quindi riferimento alla tabella 1 per la simbologia usata nelle seguenti righe.

Nel caso si faccia affidamento ad una previsione i costi delle attività di protezione sono i seguenti:

$$C * (a + b) + L * c$$

ovvero il costo di protezione sarà speso ogni previsione positiva (a+b) e a questo si aggiungeranno le spese dovute ai danni L per ogni mancato allarme (c).

Nel caso che la previsione sia perfetta si ha:

- p (frequenza/probabilità dell'evento) = $(a + b) / N$
- c (numero di mancati allarmi) = 0

quindi il costo sarà espresso da:

$$C * p * N \quad (p < 1)$$

dove p è la probabilità climatologica dell'evento ed N il numero di casi totali (numero di eventi più non eventi).

Per definizione la previsione ha un valore se il costo della protezione, applicando la previsione, è minore rispetto ai due costi descritti nel paragrafo precedente, ovvero se abbiamo:

$$C * (a + b) + L * c < L * p * N = L * (a + c) \quad (\text{danno climatologico})$$

$$\rightarrow C + (a + b) < L * a$$

e anche

$$C * (a + b) + L * c < C * N \quad (\text{costo assoluto della protezione})$$

Riportando il ragionamento in una rappresentazione analoga alla figura 1, si ottiene che il costo del sistema di previsione/protezione è dato dalla funzione di C/L :

$$C/L * (a + b) + c$$

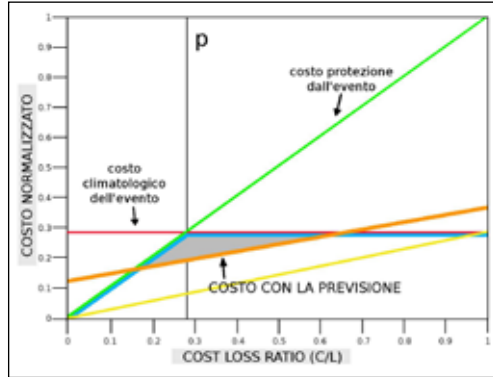
che equivale alla retta arancione riportata nella figura 2. Tale linea è quella del costo normalizzato seguendo le indicazioni della previsione per scegliere se applicare la protezione.

Dalla figura si osserva che in alcuni casi la linea arancione si trova al di sotto della linea blu (la previsione ha valore) e in altri casi si trova al di sopra (previsione senza valore).

La nostra opzione di utilizzare la previsione o meno varia quindi col rapporto C/L e con la performance della previsione che utilizziamo.

In generale se il rapporto C/L è molto basso (parte sinistra del grafico) l'opzione della protezione assoluta può essere conveniente, mentre, se C/L è molto alto può non essere conveniente applicare il sistema di protezione; in quest'ultimo caso, anche se la previsione è tecnicamente buona, può non avere valore per noi in termini di scelte di protezione.

Figura 2. Nelle ordinate si riporta il costo normalizzato su N e su L; la linea diagonale identica è il costo assoluto per la protezione, e l'orizzontale rossa è il danno climatologico; a queste si aggiunge la retta arancione che rappresenta il costo utilizzando la previsione. La linea gialla sotto la arancione rappresenta il costo della previsione perfetta.



Si precisa per completezza che con il termine *Forecast Value* in letteratura si indica il preciso indice di qualità di una previsione, che consiste nel seguente rapporto:

$$\frac{(\text{costo senza previsione} - \text{costo con previsione})}{(\text{costo senza previsione} - \text{costo con previsione perfetta})}$$

2.5. Osservazioni conclusive

Le considerazioni fatte fino ad ora tengono in considerazione che sia b (falsi allarmi) che c (mancati allarmi) possano essere non nulli; è, infatti, fisiologico che una previsione abbia sia falsi che mancati allarmi. Questo aspetto della previsione non ne compromette a priori il valore, che può risultare alto anche se gli errori previsionali sono numerosi.

Allo stesso modo una previsione con ottime performance può risultare non conveniente, in particolare, nel caso che il rapporto C/L sia molto basso o molto alto. In conclusione, l'importante non è che la previsione sia perfetta ma che gli errori siano compensati da un sostanziale vantaggio nell'impiego dei risultati corretti. Una delle sfide della meteorologia è a livello comunicativo: spingere l'utilizzatore a superare la diffidenza per l'errore e lavorare sul comprendere come rendere la previsione utile ed, eventualmente, abbandonarla se non se ne può oggettivamente trarre vantaggio.

3. UN ESEMPIO DI SISTEMA DI PREVISIONE/PROTEZIONE

Segue un esempio dei contenuti sopra esposti. Ipotizziamo un sistema costituito da un grande concessionario di auto che è costretto a tenere all'aperto molti veicoli per mancanza di spazio coperto. Durante la stagione convettiva si verificano occasionalmente delle pericolose grandinate che possono danneggiare i veicoli.

Il metodo di protezione volta per volta consiste nel trasportare le auto dal parcheggio all'aperto ad un parcheggio che può essere affittato per l'esigenza.

Ipotizziamo che:

$p = 0.02$ sia la probabilità climatologica dell'evento;

$C = 50$ sia il costo di protezione di volta in volta per ogni veicolo;

$L = 1000$ sia il danno potenziale per ogni veicolo;

Si ha quindi che $C/L = 0.05 > p$

ovvero, dato il costo delle operazioni di protezione, senza previsione conviene lasciare che il danno avvenga. Supponiamo ora di avere a disposizione una previsione che abbia le seguenti performance:

	E	NE
F	1	8
NF	1	90

Tabella 3. Tabella di contingenza della nostra previsione di grandine su 100 casi.

Utilizzando la previsione abbiamo un costo di protezione pari a:

$$C * (a + b) = 50 * 9 = 450$$

+

$$L * c = 1000 * 1 = 1000$$

=

$$1450$$

Il costo dovuto al danno climatologico è invece:

$$L * p * N = 1000 * 0.02 * 100 = 2000$$

La conclusione è che la previsione risulta conveniente rispetto al danno climatologico. Si noti che la previsione, in questo caso, produce un notevole numero di falsi allarmi e, quindi, le performance assolute non elevate; tuttavia, lo scarso costo della protezione rispetto al danno (basso rapporto C/L) ci permette di risparmiare avvalendoci delle (poche) previsioni corrette di evento anche a fronte di un numero consistente di falsi allarmi.

Anche una previsione sovrastimata come questa in esempio può quindi risultare vantaggiosa se il rapporto C/L risulta opportunamente basso.

Bibliografia

WILKS DANIEL S. (1995), *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, London, Academic Press.
 JOLLIFFE IAN T., STEPHENSON DAVID B. (2011), *Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science*, Chichester, Wiley.

Sitografia

WWRP/WGNE Joint Working Group on Forecast Verification Research
<http://www.cawcr.gov.au/projects/verification/>
 (ultima consultazione in data 10 novembre 2017).

PIERLUIGI RANDI*

Evoluzione di eventi temporaleschi severi

RIASSUNTO: In epoca di *climate change*, ovvero di cambiamenti climatici forzati dal costante aumento della temperatura media terrestre, particolare importanza assume la previsione relativa ai fenomeni temporaleschi severi. È un aspetto che da sempre riguarda la penisola italiana, ma che proprio nel contesto climatico attuale è divenuto particolarmente importante, e nel contempo anche complesso, a causa di condizioni che, soprattutto nei bassi strati dell'atmosfera, sono sensibilmente variate rispetto al passato. Se da un lato è noto che violente grandinate, raffiche di vento, trombe d'aria ed alluvioni lampo (ovvero che si esplicano in tempi molto brevi) siano sempre comparse sul nostro territorio, con particolare riferimento alla pianura padana, dall'altro vi sono evidenze che tali fenomeni stiano diventando mediamente più intensi, a fronte di una frequenza all'incirca stabile, che causa bassi strati atmosferici eccessivamente caldi, particolarmente nel periodo estivo che si sta mostrando quello più sensibile al cambiamento climatico stesso.

PAROLE CHIAVE: temporali, tornado, grandine, previsione, cambiamenti climatici.

KEYWORDS: thunderstorm, climate change, windshear, supercells, nowcasting.

1. TIPOLOGIE DI FORMAZIONI TEMPORALESCHESCHE

Si distinguono quattro principali categorie di temporali: cella singola, QLCS (*Quasi Linear Convective System*), MCS ed MCC (*Mesoscale Convective System* e *Mesoscale Convective Complex*): supercelle (figura 1).

Le celle singole rappresentano temporali di dimensioni relativamente piccole e con breve durata che si formano in condizioni di debole *shear* (variazione in direzione e velocità) verticale del vento (figura 2).

I QLCS rappresentano sistemi temporaleschi di grandi dimensioni di tipo lineare che si innescano in condizioni di forte *shear* verticale del vento (figura 3).

Gli MCS ed MCC sono sistemi convettivi di grandi dimensioni di tipo circolare o sagomati a V (*V-shaped*) che si innescano in condizioni di forte *shear* verticale del vento, con convezione profonda su aree molto estese e per molto tempo (figura 4).

* Tecnico meteorologo certificato; Meteocenter s.r.l.; Socio AISAM; Segretario Associazione AS.M.ER. Emilia Romagna Meteo.

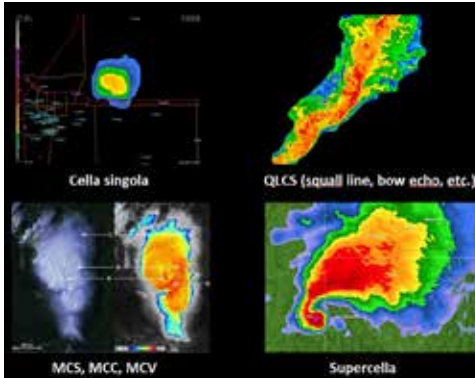


Figura 1.



Figura 3.



Figura 5.



Figura 6.

La supercella è una singola cella convettiva che presenta una corrente ascensionale in rotazione, generalmente associata ad una piccola depressione alla mesoscala (mesociclone), che grazie al forte *shear* verticale del vento interagisce solo parzialmente con la corrente discendente, dando la possibilità alla cella di auto-alimentarsi e durare nel tempo (figura 5).

In base alla suddetta classificazione si stimano varie categorie di rischio come evidenziato dalla tabella seguente (figura 6).

2. GLI ELEMENTI NECESSARI PER L'INNESCO DI TEMPORALI SEVERI

2.1 Il ruolo del *windshear*

Per lo sviluppo di celle temporalesche generiche servono due fattori fondamentali: aria instabile e moti verticali, intesi come una corrente di aria calda che dal suolo si innalza fino a quote via via più elevate. Ma per lo sviluppo di celle temporalesche violente, e quindi estremamente pericolose, è necessario l'intervento di un terzo fattore: il *windshear* verticale positivo, ovvero una brusca e repentina variazione in direzione ed in velocità del vento a mano a mano che si sale di quota, con direzione che tende a ruotare in senso orario mentre si eleva a quote progressivamente più elevate (figura 7-8).

Tale aspetto è particolarmente importante poiché:

- mantiene attiva la separazione di corrente ascendente e discendente prolungando il ciclo evolutivo dei sistemi temporaleschi;

- amplifica la forza e l'intensità della corrente ascensionale ben oltre quanto si potrebbe spiegare con la sola forza di galleggiamento;
- alimenta vortici di aria ad asse orizzontale tra le diverse quote, i quali possono essere tramutati ad asse verticale attraverso le correnti ascensionali calde che alimentano il temporale;
- può mantenere in vita le tempeste anche nelle ore notturne compensando la naturale perdita di instabilità con effetti dinamici.

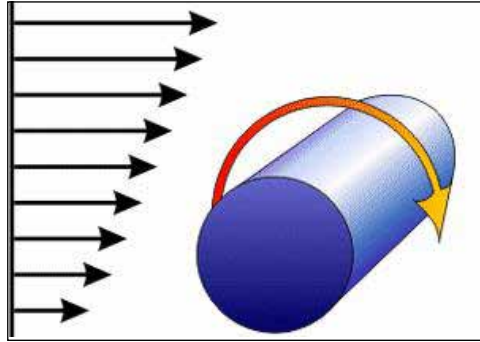


Figura 7.

2.2 Il ruolo del CAPE

Il CAPE (*Convective Available Potential Energy*) indica l'energia potenziale disponibile per la convezione e rappresenta l'energia totale di galleggiamento acquisita dalla massa d'aria finché, durante l'ascesa, resta più calda dell'ambiente circostante; in pratica è una misura del lavoro svolto dalla spinta di galleggiamento e si esprime in J/kg di aria.

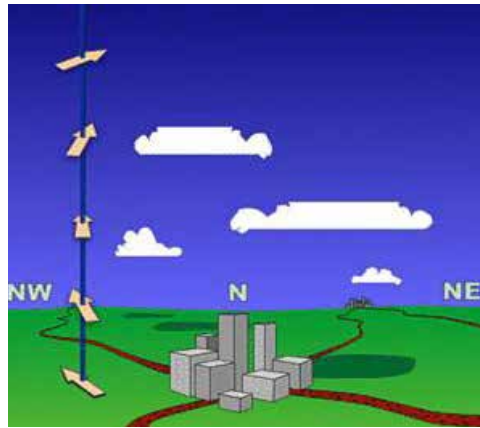


Figura 8.

Maggiore è la quantità di CAPE disponibile, più intense e prolungate saranno le correnti ascensionali che sosterranno il sistema temporalesco, qualora ovviamente si abbia una spinta iniziale, dovuta eventualmente all'arrivo di un fronte, la presenza di rilievi, convergenza di venti di basso livello ecc.

3. TEMPORALI MULTICELLULARI LINEARI (QLCS)

Questo tipo di formazione temporalesca, costituita da una serie di celle convettive strettamente allineate ed in diversi stadi di sviluppo, deve le sue caratteristiche alla netta separazione tra correnti ascendenti e correnti discendenti operata da forti venti in quota ed è tipicamente associata al passaggio di fronti di aria fredda o alla presenza di aria assai fredda alle quote superiori. Nei sistemi temporaleschi composti da più celle il fenomeno della rigenerazione porta alla continua nascita di nuove cellule, in modo che il temporale possa mantenere le sue caratteristiche.

In un temporale multicellulare ogni cella si origina 5-10 km prima del corpo principale (ovvero davanti o dietro il nucleo centrale) e alla destra dello stesso ri-

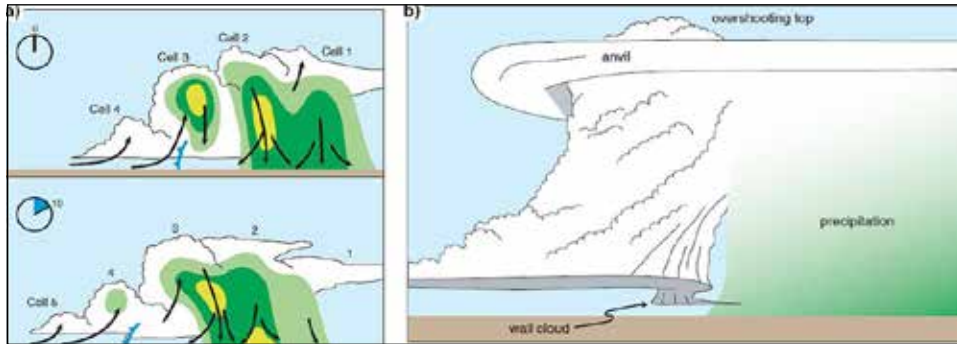


Figura 9.

spetto alla direzione di spostamento del *cluster*. Il ritmo di rigenerazione delle nuove cellule è in media una ogni 15 minuti e siccome la loro vita è di circa 45 minuti, mediamente in ogni temporale multicellulare convivono 3-4 celle, le quali ovviamente avranno diversi stadi di sviluppo (sviluppo, maturazione, dissolvimento). La rigenerazione si ha quando l'aria fredda in discesa dalla cella principale solleva, attraverso il fronte delle raffiche, nuova aria calda presente davanti innescando nuove celle: si ha quindi un temporale multicellulare di tipo lineare (figura 9).

I QLCS sono assai pericolosi, poiché le nuove celle si formano davanti alle vecchie ed il sistema evolve più rapidamente di quanto possa apparire a vista. Apportano violenti rovesci, forti colpi di vento, grandine e talora fenomeni vorticosi, ma passano rapidamente (figura 10).

4. TEMPORALI MULTICELLULARI DI TIPO CIRCOLARE (MCS, MCC)

Si tratta di sistemi temporaleschi costituiti da diverse celle ravvicinate tra loro ed in diversi stadi evolutivi. Si differenziano dai QLCS poiché non sono sagomati a linea ma piuttosto a 'grappolo' o con struttura circolare. Generalmente persistono per molte ore e possono percorrere molti chilometri rimanendo assai attivi, supportati dal continuo ricambio tra celle in dissoluzione e celle giovani in formazione lungo una zona di discontinuità, sia di temperatura che di umidità relativa (figura 11). Al contrario dei QLCS, inoltre, apportano fenomeni meno violenti nell'unità di tempo, minore probabilità di grandine e di fenomeni vorticosi, ma, dal momento che impiegano maggior tempo per transitare, possono rilasciare grandi quantità di pioggia.

Un MCS (*Mesoscale Convective System*) è un sistema organizzato esteso orizzontalmente per parecchie centinaia di km (200-400 km alle medie latitudini) e di forma circolare o ovale, a convezione profonda, attivo per più di 4 ore e spesso riconoscibile da una vasta formazione ad incudine nella media o alta troposfera. Porta forti piogge (>50mm in 12 ore), inondazioni, grandine ma essenzialmente nella prima fase, forte vento, intensa attività elettrica, raramente trombe d'aria.

5. TEMPORALI A SUPERCELLA

La supercella è in assoluto il temporale più pericoloso e potente fra tutti quelli esistenti. La caratteristica, infatti, che lo distingue dagli altri è la presenza di una corrente ascensionale calda rotante che viene indicata come mesociclone (figura 12).

La sua formazione richiede una particolare concomitanza di eventi; per questo le supercelle sono fenomeni relativamente rari sul nostro territorio e spesso il loro numero viene sovrastimato, qualora si manifestino temporali violenti tali da destare notevole impressione nell'osservatore.

Anche in questo caso un ruolo primario che conduce al loro innesco è ascrivibile al *windshear* verticale, ovvero ad una brusca variazione in direzione e velocità del vento con la quota. Non tutti i tipi di *windshear* sono però adatti: ne serve a sufficienza per separare corrente ascendente e discendente, ma non troppo da ridurre la sinergia tra le due (altrimenti si formano multicelle). Per poter classificare un temporale a supercella come tale sono necessari alcuni requisiti, tra cui la circolazione mesociclonica per almeno un terzo della profondità della corrente ascensionale e la durata della circolazione vorticoso dell'ordine di almeno 10-20 minuti.

Diversi studi (THOMPSON *et al.* 2003 e 2006) e vari ricercatori americani quando si trovano di fronte a casi 'ibridi' che non presentano tutte le condizioni appena citate, usano indicare queste celle temporalesche come '*marginal supercell*', proprio perché hanno caratteristiche intermedie tra un temporale comune e una supercella. Il mesociclone associato ad una supercella può, in condizioni particolarmente favorevoli, condurre alla formazione di tornado (trombe d'aria), con effetti che possono risultare devastanti (si ricordi per esempio il tornado di Dolo e Mira, nel veneziano, dell'8 luglio 2015) (figura 13).



Figura 11.



Figura 12.



Figura 13.

Nel nostro paese in genere l'instabilità termodinamica (CAPE) non è così importante come negli altri paesi (USA e Europa continentale), ma presenta condizioni più affini a Grecia e Inghilterra. Sempre in Italia la complessa orografia (Alpi, Appennino, profili costieri) tende a modulare e forzare sensibilmente il *windshear* nei bassi strati, con incremento dei parametri di elicità tra il suolo ed i 3000 m circa, ritenuti importanti nella tornadogenesi. Le condizioni di *windshear* e CAPE non sono le stesse sulle varie zone del pianeta. Ad esempio nella Tornado Alley (USA) abbondano *windshear* e CAPE con fenomeni spesso davvero estremi. In Italia le condizioni sono diverse: più spesso molto *windshear* e poco CAPE.

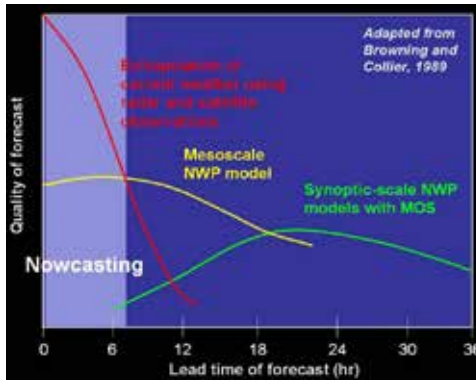


Figura 14.

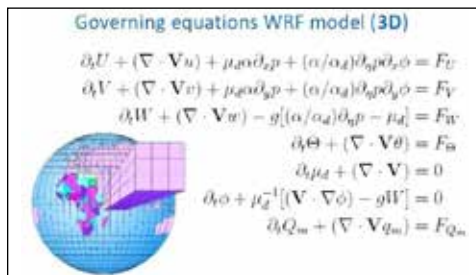


Figura 15.

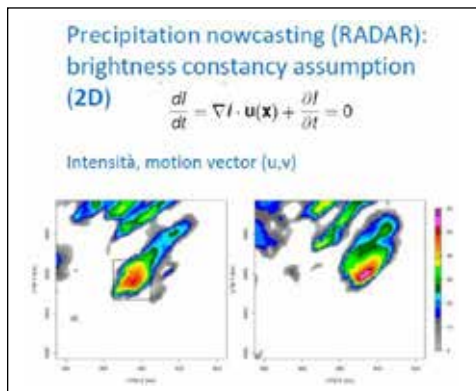


Figura 16.

Ad esempio nella Tornado Alley (USA) abbondano *windshear* e CAPE con fenomeni spesso davvero estremi. In Italia le condizioni sono diverse: più spesso molto *windshear* e poco CAPE.

6. LA PREVISIONE DEI FENOMENI TEMPORALESCHI SEVERI

6.1 Nowcasting, forecasting e predicibilità

L'atmosfera è un sistema caotico e non lineare, e ciò comporta dei limiti teorici (LORENZ, 1969). L'accuratezza dei metodi basati sulla estrapolazione (satellite, radar) decresce rapidamente a causa della mancanza di corretta simulazione dei processi fisici; il 'cross-over time' è intorno a 2-3 ore (figura 14).

Il *weather forecasting* rappresenta applicazioni della scienza e tecnologia per prevedere le condizioni dell'atmosfera per una data posizione e un dato tempo (figura 15).

Il *nowcasting* è la descrizione dello stato attuale dell'atmosfera e la previsione di come essa potrà evolvere nell'arco delle ore successive (2 su base WMO (figura 16). Tra gli obiettivi del *nowcasting*, ovvero della previsione a brevissimo termine, i principali sono: colmare il divario tra lo scenario

previsto e quello che effettivamente accade, ridurre le necessità di interpretazione soggettiva, guadagnare tempo sulla predicibilità estendendola di più ore.

Come da definizione dell'Organizzazione Meteorologica Mondiale, il *nowcasting* contribuisce alla riduzione di incidenti mortali e lesioni dovute a pericoli meteorologici, alla riduzione dei danni alla proprietà pubblica e privata, al miglioramento dell'efficienza e del risparmio per l'industria, trasporti e agricoltura.

6.2 Metodologie di nowcasting

- *Area-based*: stima i vettori di spostamento sull'intero dominio radar (*Block-based methods*, metodi variazionali).
- *Object-based*: identifica e processa le celle temporalesche individualmente, tracciandone la traiettoria passata e cercando di prevederne lo spostamento futuro.
- *Probabilistic*: stima la probabilità di verificarsi di precipitazioni superiori a determinate soglie, su ogni punto del dominio radar.

7. PROSPETTIVE

La stagione 'calda' (maggio-settembre), che si sta dimostrando la più sensibile in tema di incremento delle temperature, sta subendo una sempre maggiore frequenza ed intensità di onde di calore sub-tropicali (avvezioni dal nord Africa), con valori medi di CAPE più elevati rispetto al passato. E se da un lato è stato appurato che il CAPE non è l'elemento essenziale per determinare rotazione e quindi fenomeni vorticosi, dall'altro è pur vero che favorisce convezione profonda e prolungata in grado di incrementare il *tilting* e lo *stretching* (allungamento) verso l'alto degli assi di vorticità favoriti dal *windshear*.

Ecco perché estati sempre più calde potranno avere un importante ruolo nell'accrescere sensibilmente l'incidenza di tempeste severe, a causa del passaggio da un mix 'poco CAPE molto *windshear*' ad un mix 'molto CAPE molto *windshear*' (figure 17-18).

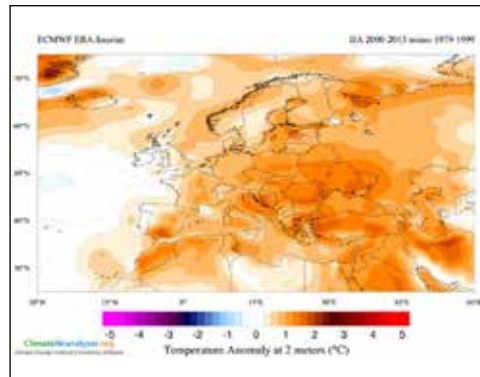


Figura 17.

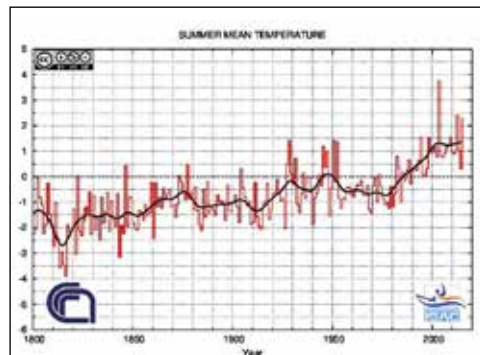


Figura 18.

Bibliografia

- COMET CD-Module, *Anticipating Convective Storm Structure and Evolution with online key points*.
- BLUESTEIN H.B., BANCOS P.C. (2002), *The vertical profile of wind and temperature in cyclones and anticyclones over the eastern two thirds of the United States: A climatology*, "Monthly Weather Review", 130, pp. 477-506.
- BLUESTEIN H.B., PARKS C.R. (1983), *A synoptic and photographic climatology of low-precipitation severe thunderstorms in the southern plains*, "Monthly Weather Review", 111, pp. 2034-2046.
- BLUESTEIN H.B., WOODALL G.R. (1990), *Doppler radar analysis of a low-precipitation severe storm*, "Monthly Weather Review", 118, pp. 1640-1664.
- BUNKERS M.J. (2002), *Vertical wind shear associated with left-moving supercells*, "Weather and Forecasting", 17, pp. 845-855.
- BUNKERS M.J., JOHNSON J.S., GRZYWACZ J.M., CZEPYHA L.J., KLIMOWSKI B.A. (2002), *A Preliminary Investigation of Supercell Longevity*, Preprints, 21st Conf. on Severe Local Storms, San Antonio, Texas, American Meteorological Society, TBD.
- BURGESS D.W., LEMON L.R. (1990), *Severe thunderstorm detection by radar. Radar in Meteorology*, D. Atlas, Ed., American Meteorological Society, pp. 619-647.
- DOSWELL C.A. III (1991), *A review for forecasters on the application of hodographs to forecasting severe thunderstorms*, "National Association Weather Digest", 16 (1), pp. 2-16.
- DOSWELL C.A. III, MOLLER A.R., and PRZYBYLINSKI R. (1990), *A unified set of conceptual models for variations on the supercell theme*, Preprints, 16th Conf. on Severe Local Storms, Kananaskis Park, Alberta, Canada, American Meteorological Society, pp. 40-45.
- KLEMP J.B. (1987), *Dynamics of tornadic thunderstorms*, "Annual Review of Fluid Mechanics", 19, pp. 369-402.
- MOLLER A.R., DOSWELL C.A. III, PRZYBYLINSKI R. (1990), *Highprecipitation supercells: A conceptual model and documentation*. Preprints, 16th Conf. on Severe Local Storms, Kananaskis Park, Canada, American Meteorological Society, pp. 52-57.
- MOLLER A.R., DOSWELL C.A. III, FOSTER M.P., WOODALL G.R. (1994), *The operational recognition of supercell thunderstorm environments and storm structures*, "Weather Forecasting", 9, pp. 327-347.
- ROTUNNO R. (1993), *Supercell thunderstorm modeling and theory*, "Geo. Monograph" 79, pp. 57-73.
- ROTUNNO R., KLEMP J.B. (1982), *The influence of the shearinduced pressure gradient on thunderstorm motion*, "Monthly Weather Review", 110, pp. 136-151.
- ROTUNNO R., KLEMP J. (1985), *On the rotation and propagation of simulated supercell thunderstorms*, "Journal of the Atmospheric Sciences", 42, pp. 271-292.
- WEISMAN M.L., KLEMP J.B. (1982), *The dependence of numerically simulated convective storms on vertical wind shear and buoyancy*, "Monthly Weather Review", 110, pp. 504-520.
- WEISMAN M.L., KLEMP J.B. (1984), *The structure and classification of numerically simulated convective storms in directionally varying wind shears*, "Monthly Weather Review", 112, pp. 2479-2498.
- SETVAK M., LINDSEY D., NOVAK P. (2009), *Cold ring shaped storms in central Europe*, ESSL.
- GALLINO S. (2007), MCS e gust fronts; ARPAL Genova.

Sitografia

- <http://www.aisam.eu/>
- <http://www.fenomenitemporaleschi.it/>
- <http://www.nimbus.it>
- <http://www.scientificast.it/>
- <http://www.meteocenter.it>
- <http://www.emiliaromagnameteo.com>
- <http://www.meteonetwork.it>
- <http://www.comet.ucar.edu/>
- <http://www.noaa.gov/>
- <https://www.climate.gov/news-features>

LUCA PANZIERA*

***Nowcasting* di pioggia e temporali: l'esperienza svizzera**

RIASSUNTO: Il *nowcasting* di temporali e precipitazioni è un incarico importante richiesto in molti settori che vanno dalla protezione civile alla sicurezza aerea e per avvisare la popolazione in generale. Questo scritto introduce gli strumenti principali del *nowcasting* utilizzati presso MeteoSvizzera. In primo luogo, viene presentato un algoritmo per il rilevamento automatico e il rilevamento di temporali; il sistema si basa su dati inviati da un radar meteorologico. In secondo luogo, viene presentato un algoritmo di estrapolazione lagrangiana utilizzato per prevedere in un prossimo futuro, la posizione e l'intensità delle precipitazioni. La presentazione illustra anche le sfide scientifiche del *nowcasting* nelle regioni montuose.

PAROLE CHIAVE: *nowcasting*, radar meteorologico, precipitazioni, temporali.

ABSTRACT: Precipitation and Thunderstorms nowcasting: the Swiss experience

Nowcasting precipitation and thunderstorms is an important task which is required for many applications ranging from civil protection to aviation safety to automatic warnings for the general public. This presentation introduces the main nowcasting tools used at MeteoSwiss. First, an algorithm for the automatic detection and tracking of thunderstorms is presented; the system is based on the data from weather radar. Second, a Lagrangian extrapolation algorithm used to predict in the near future the position and intensity of precipitation is presented. The presentation also illustrates the scientific challenges of nowcasting in mountainous regions.

KEYWORDS: nowcasting, weather radar, precipitation, thunderstorms.

La previsione meteorologica a cortissimo termine, la cui validità si estende cioè alle successive 4-6 ore, viene chiamata *nowcasting*, e si basa principalmente sull'extrapolazione nel tempo delle grandezze meteorologiche osservate in tempo reale, quali ad esempio temperatura, vento, nuvolosità, precipitazioni, mediante metodi empirici e statistici.

Il *nowcasting* della pioggia e dei temporali si basa sulle misure rilevate dal radar meteorologico, dalle stazioni di misura al suolo e dai satelliti, che vengono effettuate in tempo reale. Esso è necessario per emanare allerte per situazioni di maltempo per il pubblico e le autorità, per ridurre il rischio e i danni alle proprietà in caso di maltempo, per garantire la sicurezza dei trasporti aerei, dei cantieri, delle manifestazioni sportive, etc. Dato che piogge e temporali si sviluppa-

* Dipartimento di Geografia, Università di Berna e MeteoSvizzera, Locarno Monti, Svizzera.

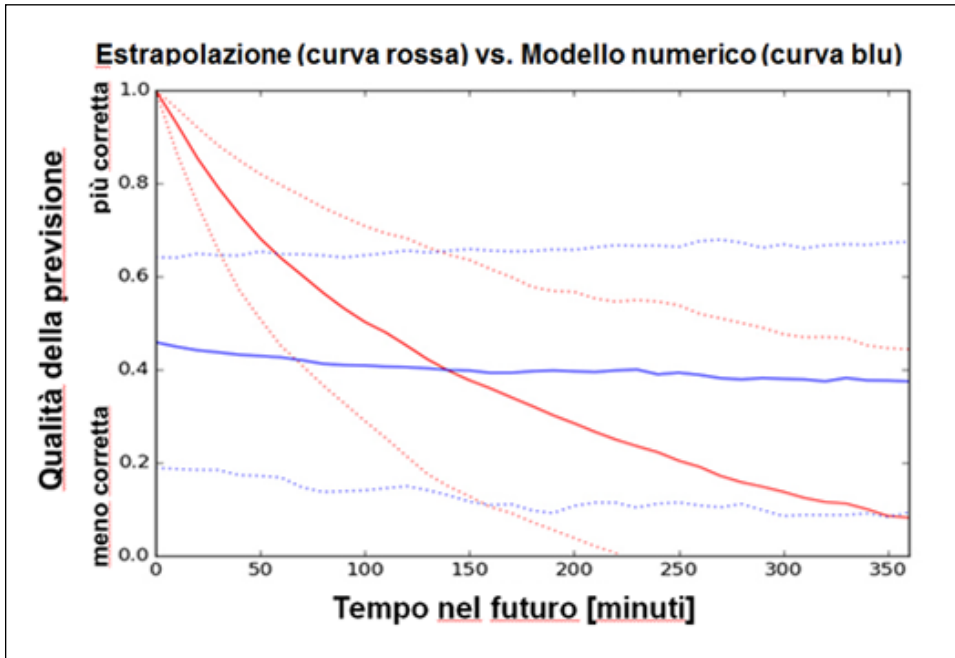


Figura 1. Qualità della previsione di pioggia fornita da un algoritmo di nowcasting (curva rossa) e da un modello numerico (curva blu).

no molto velocemente, i modelli numerici usati per le previsioni a medio termine non possono beneficiare delle osservazioni più recenti ed essere lanciati ogni 5 minuti, in quanto l'assimilazione dei dati e la produzione della previsione richiederebbero più tempo di quello del periodo per il quale la previsione viene prodotta. Il *nowcasting* basato sui dati del radar meteorologico, invece, non richiede lunghi tempi di calcolo (solitamente pochi minuti) e permette quindi di sfruttare al meglio le osservazioni di pioggia. La figura 1 mostra la qualità della previsione di un metodo di *nowcasting* (curva rossa), in questo caso l'estrapolazione lagrangiana che verrà introdotta più avanti, e di un modello numerico (curva blu), in questo caso cosmo1, nelle prime ore di previsione, basata su 1872 ore di pioggia in Svizzera. Appare evidente come nelle prime due ore la qualità del metodo di *nowcasting* sia superiore a quella del modello numerico, mentre a partire dalle due ore essa risulti inferiore (figura 1).

Lo strumento principe per il *nowcasting* delle precipitazioni è il radar meteorologico. La Svizzera può vantare un'esperienza di oltre 60 anni nella meteorologia radar, e recentemente la rete dei radar svizzeri è stata completamente rinnovata. L'intero territorio nazionale è coperto ora da 5 radar, posizionati sul Monte Lema vicino a Lugano, sull'Albis vicino a Zurigo, sul La Dole vicino a Ginevra, al Weissfluhjoch nel Canton Grigioni e al Pointe de la Plaine Morte nel Canton Vallese (figura 2).

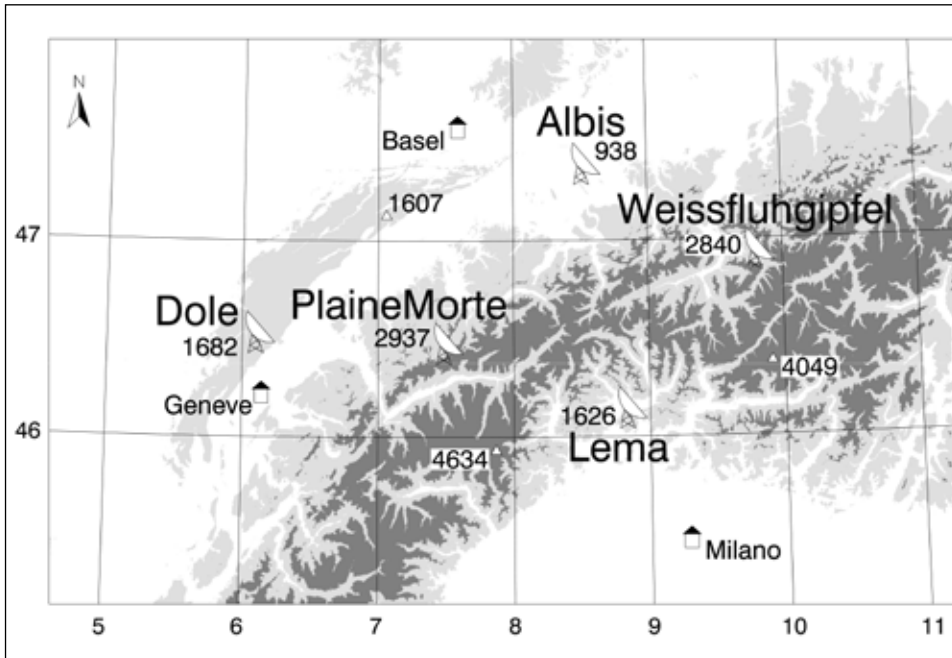


Figura 2. La rete svizzera dei radar meteorologici.

Per quanto riguarda il *nowcasting* dei temporali, il desiderio è quello di identificare i temporali in atto, stimarne l'intensità, monitorarne l'evoluzione, stimare la presenza di grandine, prevederne la posizione durante l'ora successiva e alertare di conseguenza le regioni sulle quali i temporali si dirigono.

L'algoritmo sviluppato da MeteoSvizzera che fornisce tutte queste informazioni ogni 5 minuti si chiama Thunderstorm Radar Tracking (HERING *et al.*, 2008), e utilizza i dati del radar meteo per identificare i temporali, i dati della rete di rilevamento fulmini, e l'altezza dello zero termico fornita dal modello numerico cosmo. Mediante una soglia di riflettività dinamica vengono identificati i massimi isolati di riflettività, che corrispondono ai temporali.

Il movimento del temporale viene stimato per mezzo dell'avvezione derivata dai vettori spostamento degli ultimi 15 minuti, in cui vengono considerate anche le possibili divisioni e riunificazioni dei vari temporali. L'algoritmo è anche in grado di stimare la potenza del temporale e classificarlo in 4 classi di intensità basandosi sul VIL (acqua liquida integrata verticalmente) stimato da radar, sull'altezza dell'eco di 45 dBZ, sulla riflettività massima nel temporale, e sull'area con riflettività >55 dBZ.

In sovrapposizione all'immagine radar vengono quindi indicate delle ellissi corrispondenti ad ogni temporale, e la posizione del temporale nei prossimi 15, 30, 45 minuti e 1 ora viene indicata con delle ellissi tratteggiate (figura 3). L'area dell'ellisse è proporzionale all'incertezza nella previsione della posizione (devia-

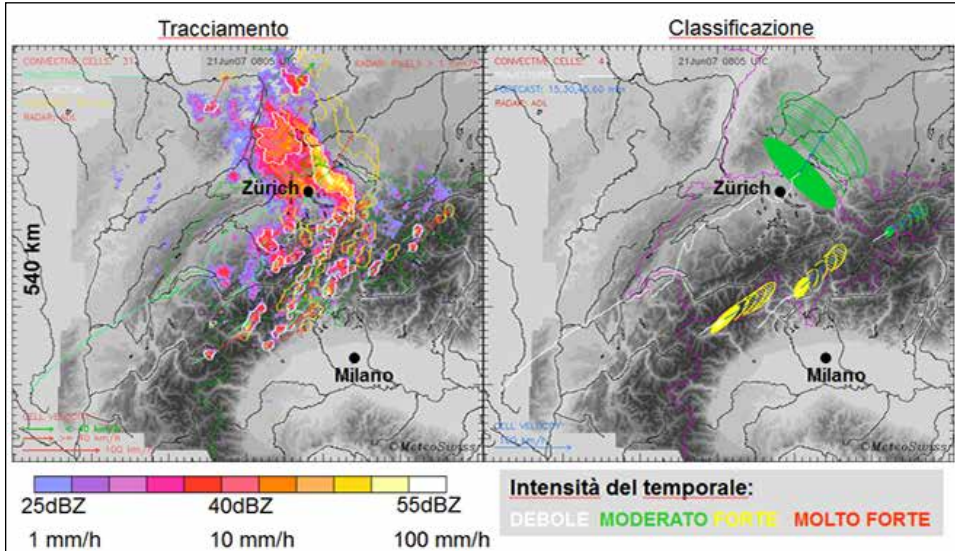


Figura 3. Thunderstorm Radar Tracking, esempio del tracciamento e della classificazione dei temporali.

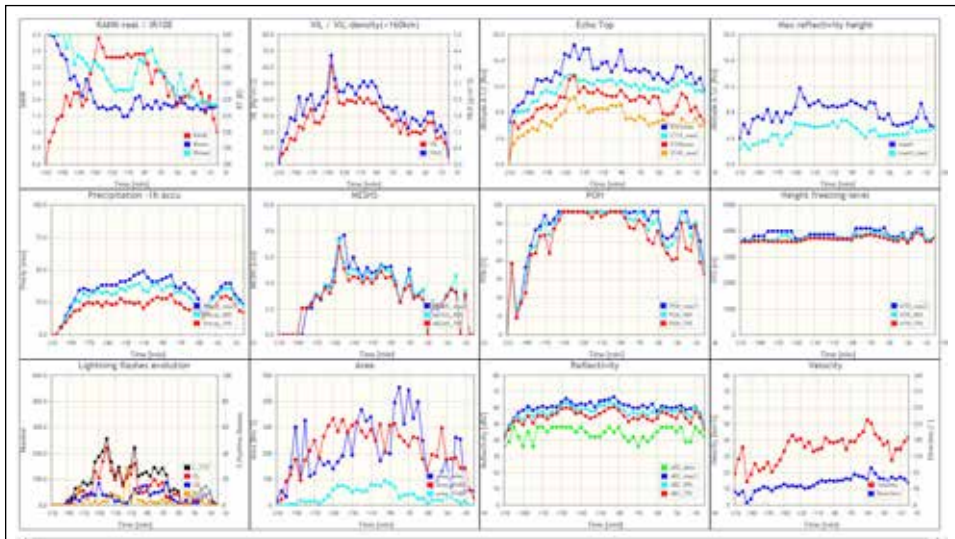


Figura 4. Thunderstorm Radar Tracking, informazioni fornite in tempo reale circa lo sviluppo del temporale.

zione standard dei vettori velocità degli ultimi 15 minuti). Una funzionalità molto utile che il sistema offre al previsore è anche quella di avere in tempo reale informazioni su diversi parametri importanti relativi allo sviluppo del temporale. La figura 4 mostra la schermata che genera il TRT quando si clicca su una cella temporalesca. Nell'estate del 2017 è stata aggiunta la possibilità di identificare i

temporali grandinigeni ed emanare un'allerta grandine. La stima della grandine in un temporale viene fatta anch'essa sulle informazioni del radar meteorologico e dell'altezza dello zero termico fornita dal modello numerico cosmo, mediante l'utilizzo di algoritmi empirici che associano la probabilità di osservare grandine allo spessore dello strato atmosferico compreso tra l'altezza dello zero termico e specifici valori di riflettività (figure 3, 4).

Mentre nel *nowcasting* dei temporali l'elemento da prevedere è il temporale, il *nowcasting* della pioggia viene effettuato su tutta la griglia della precipitazione osservata dal radar. In altre parole, viene prevista la posizione non solo dei nuclei di pioggia più intensa, i temporali, ma di tutto il campo di precipitazione. A questo scopo si usa la tecnica della persistenza lagrangiana che, in modo simile a quanto svolto dal TRT, consiste nell'individuare la velocità e la direzione di spostamento della pioggia nel passato recente e assumere che anche nel prossimo futuro essa si sposterà con la stessa velocità e direzione.

L'algoritmo per il *nowcasting* della pioggia attualmente in uso a MeteoSvizzera si chiama MAPLE (McGill Algorithm for Precipitation Nowcasting, GERMANN and ZAWADZKI, 2002; TURNER *et al.*, 2004), ed è stato sviluppato in Canada. La figura 5 mostra un esempio di una previsione a 15 minuti negli Stati Uniti, territorio per il quale l'algoritmo fornisce previsioni di qualità per le 5-6 ore successive. In assenza di orografia importante, infatti, i processi che portano alla formazione della precipitazione non vengono modificati in modo significativo in presenza di sistemi sinottici ben organizzati.

La situazione è molto diversa in Svizzera, dove la presenza delle Alpi favorisce la formazione della precipitazione sul versante sopra vento, mentre sul versante sottovento la pioggia viene inibita. Foresti *et al.* (2018) mostra l'errore sistematico dell'algoritmo MAPLE sulla Svizzera, generato dalla presenza di orografia complessa (figura 5).

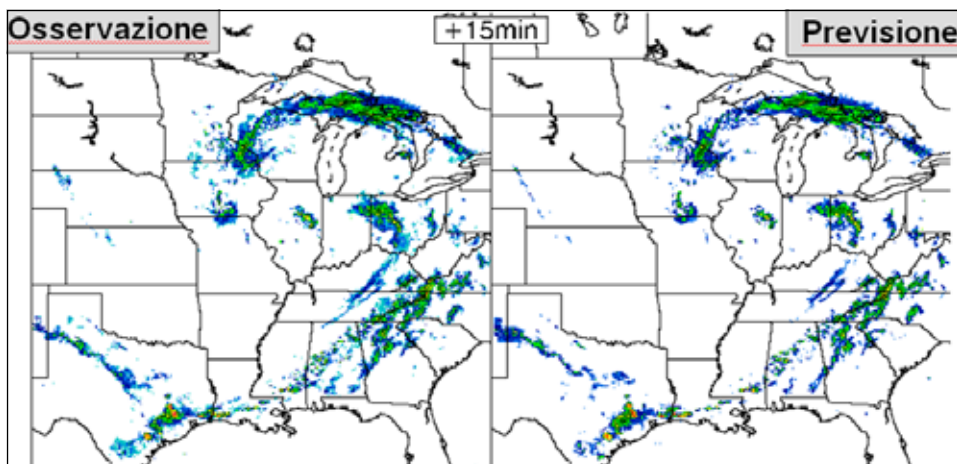


IMMAGINE
IN BASSA

Figura 5. MAPLE, esempio di nowcasting di pioggia negli Stati Uniti.

Ritornando alla figura 1, appare evidente come per ottenere previsioni con la massima qualità possibile sia necessario affidarsi ai metodi di *nowcasting* empirici per le prime due ore, e alle previsioni del modello numerico per le ore successive. A MeteoSvizzera questo viene svolto al momento da INCA, un sistema che integra l'estrapolazione dei campi radar con la previsione del modello numerico COSMO1. In particolare, i campi di pioggia generati dai due sistemi vengono mediati utilizzando dei pesi che dipendono dall'estensione temporale della previsione: all'inizio viene dato maggiore peso alla previsione dell'estrapolazione lagrangiana (indicativamente fino alla seconda ora), mentre in seguito viene dato maggior peso alla previsione del modello numerico.

Bibliografia

FORESTI, L., SIDERIS I., PANZIERA L., NERINI D., GERMANN U. (2018), *A 10-year radar-based analysis of orographic precipitation growth and decay patterns over the Swiss Alpine region*, "Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society", sottomesso.

GERMAN U., ZAWADZKI I. (2002), *Scale-dependence of the Predictability of Precipitation From Continental Radar Images. Part I: Description of the Methodology*, "Monthly Weather Review", 130, 2859-2873.

HERING A. M., GERMANN U., BOSCACCI M., SÉNÉSI, S. (2008), *Operational nowcasting of thunderstorms in the Alps during MAP DPHASE*, "The Fifth European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology", Helsinki.

TURNER, B. J., ZAWADZKI, I., GERMANN, U. (2004): *Predictability of Precipitation From Continental Radar Images. Part III: Operational Nowcasting Implementation (MAPLE)*, "Journal of Applied Meteorology", 43, 231-248.

CHIARA MARSIGLI* E TIZIANA PACCAGNELLA**

Modellistica meteorologica previsionale ad alta risoluzione

RIASSUNTO: Dopo avere introdotto il problema della modellistica previsionale ad alta risoluzione, viene presentato lo stato dell'arte della tematica in questione, suddividendo la trattazione in tre argomenti: *grey zone*, *data assimilation* ed *ensemble forecasting*. Si presenta poi la situazione della collaborazione Europea in questo campo e viene collocata la posizione dell'Italia, descrivendo il sistema modellistico di Arpae SIMC. Infine, si delineano le prospettive di sviluppo.

PAROLE CHIAVE: modellistica previsionale, previsione meteorologica, alta risoluzione, previsione di *ensemble*, sistema LAMI.

ABSTRACT: After introducing the topic of numerical modeling at high-resolution, the state-of-the-art of the field is described, organizing the discussion in three arguments: grey zone, data assimilation and ensemble forecasting. The situation of the European collaboration in this sector is then presented, accounting also for the Italian contribution, with a description of the modeling system of Arpae SIMC. Finally, the future perspectives are outlined.

KEYWORDS: prediction modeling, meteorological forecast, high resolution, ensemble forecast, LAMI forecast system.

1. INTRODUZIONE

La presente Memoria vuole essere un contributo specifico al vasto ed articolato tema descritto dal titolo. Il suo scopo è fornire un aggiornamento sullo stato dell'arte della modellistica meteorologica previsionale ad alta risoluzione, prevalentemente in ambito italiano ed europeo, e delineare le principali sfide e le linee di sviluppo nel settore.

Un modello numerico previsionale è un complesso algoritmo fisico-matematico che consente di effettuare una previsione dello stato futuro dell'atmosfera a partire da una stima del suo stato presente. Gli stati dell'atmosfera presente e futuro sono in questo caso in realtà stati del modello stesso, e come tale rappresentano solo approssimazioni dello stato 'vero' dell'atmosfera, che è inconoscibile.

Il modello deve rappresentare in modo realistico i moti ed i processi atmo-

* Esperta di modellistica previsionale Servizio Idro-Meteo-Clima, Agenzia Regionale prevenzione ambiente ed energia dell'Emilia Romagna (ARPAE).

** Dirigente responsabile di Area Modellistica Meteorologica Marina, Servizio Idro-Meteo-Clima, Agenzia Regionale prevenzione ambiente ed energia dell'Emilia Romagna (ARPAE).

sferici. Il punto di partenza per la sua costruzione è quindi l'osservazione dei fenomeni atmosferici, seguita dallo sviluppo di modelli concettuali, che vengono poi tradotti in equazioni fisiche. Infine, le equazioni differenziali vengono tradotte in equazioni algebriche per potere essere risolte per via numerica tramite i supercomputer.

Per effettuare l'integrazione delle equazioni è necessario uno stato di partenza del sistema (condizione iniziale), che deve essere stimato a partire da osservazioni dell'atmosfera. Le osservazioni, misurate con vari metodi ed in vari punti dell'atmosfera, vengono poi 'assimilate', tramite un processo che, utilizzando le osservazioni stesse, mira a definire uno stato coerente dell'atmosfera idoneo ad inizializzare un modello numerico.

Riassumendo, gli ingredienti per una previsione meteorologica numerica sono: la conoscenza scientifica, la capacità osservativa e le risorse di supercalcolo.

Data al 1950 la prima previsione numerica di successo, ad opera di Charney, Fjørtoft e Von Neumann, che calcolarono la prima storica previsione meteorologica ad un giorno utilizzando un modello barotropico (ad uno strato) filtrato (CHARNEY *et al.* 1950). Per questo scopo utilizzarono uno dei primi computer elettronici, lo Electronic Numerical Integrator and Computer (ENIAC), situato presso Aberdeen Proving Grounds dell'esercito USA, in Maryland.

Da quella data sono stati compiuti molti passi avanti ed oggi le previsioni meteorologiche numeriche sono alla base di qualunque previsione meteorologica.

2. STATO DELL'ARTE

L'Europa possiede uno dei migliori centri di previsione meteorologica del mondo, l'European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), situato a Reading (Regno Unito). Grazie alla collaborazione tra i paesi Europei che ne sono membri, ECMWF è in grado di effettuare previsioni con risoluzione spaziale di 9 km su tutto il mondo con un orizzonte temporale di 10 giorni. Tali previsioni forniscono inoltre le condizioni al contorno (Boundary Conditions, BCs) ai paesi membri per potere integrare a loro volta i propri modelli meteorologici ad area limitata (LAM, Limited Area Model), che risolvono le equazioni del moto atmosferico solo su una porzione limitata del globo, ma con risoluzione spaziale maggiore.

Ad oggi, la maggior parte dei paesi europei effettua previsioni meteorologiche numeriche ad area limitata ad una risoluzione spaziale di 1-3 km, ad una scala che permette una rappresentazione esplicita della convezione (detta *convection-permitting*). Infatti, dato che le equazioni del modello sono risolte per una certa scala spaziale, data dal passo della griglia su cui il calcolo viene effettuato, non tutti i fenomeni fisici dell'atmosfera possono essere rappresentati esplicitamente dal modello stesso. I processi che necessitano di una risoluzione spaziale più elevata vengono rappresentati dalle cosiddette 'parametrizzazioni fisiche', cioè da modelli statistici che rappresentano l'effetto che hanno i processi non risolti sulle variabili

prognostiche del modello alla risoluzione della griglia di calcolo. Mentre la convezione è ora esplicitamente rappresentata nei modelli integrati a queste risoluzioni, altri processi rimangono parametrizzati, come la turbolenza nello strato limite planetario, i processi che avvengono nei primi strati del suolo del modello e legati alla vegetazione, i fenomeni di natura microfisica, i processi radiativi.

2.1. Grey zone

Negli ultimi anni ci si riferisce spesso alla *grey zone* modellistica come a quella porzione di scale spaziali per cui non è ancora possibile una rappresentazione completamente esplicita nel modello, ma la cui rappresentazione statistica è spesso inadeguata se non si considerano anche le interazioni con le scale risolte. Attualmente, si tende a situare la *grey zone* tra 10 e 1 km. Pertanto, una delle principali sfide modellistiche è ora disegnare schemi di parametrizzazione che tengano conto dell'interazione tra le scale risolte e quelle non risolte per i processi che devono descrivere (si veda per una *review* aggiornata <https://www.ecmwf.int/en/learning/workshops/shedding-light-greyzone>). Un classico esempio è la convezione precipitante: con una risoluzione spaziale di 2-3 km solitamente non si utilizza lo schema di parametrizzazione relativo, affidando alla dinamica del modello il compito di rappresentarla esplicitamente, ma si è già notato che per una rappresentazione soddisfacente di celle convettive soprattutto piccole e veloci sarebbe necessaria una risoluzione spaziale dell'ordine di centinaia di metri (STEIN *et al.* 2015). D'altra parte, se si attiva lo schema per la sua rappresentazione parametrizzata si nota che non si possono trascurare i fenomeni di scambio tra celle adiacenti del modello, che non vengono considerati in una parametrizzazione classica che agisce solo su una colonna di atmosfera (GERARD *et al.* 2009).

2.2. Data assimilation

Accanto all'incremento del modello in sé, l'altro ramo principale di sviluppo è quello legato alla tecnica di assimilazione dati, cioè il processo che, in base alle osservazioni disponibili delle variabili atmosferiche, si occupa di definire uno stato coerente dell'atmosfera che sia idoneo ad inizializzare un modello numerico. I due ingredienti del processo di assimilazione per determinare la condizione iniziale ad un dato istante sono le osservazioni misurate a quel momento, corredate dagli errori associati alla loro misura e rappresentatività, ed il modello stesso, o meglio uno stato del modello valido per l'istante dato (detto *background*), insieme ad una stima dell'errore della previsione. Sono proprio gli errori associati alle osservazioni ed alla previsione che determinano, seguendo un approccio di tipo Bayesiano, quale peso attribuire ai due ingredienti per formare lo stato da determinare, la cosiddetta 'analisi'.

Gli ultimi due decenni hanno visto il trionfo dell'approccio variazionale (3DVAR-4DVAR, BUEHNER *et al.* 2010), che ha permesso un notevole passo avanti nel settore anche grazie all'uso massiccio di dati da satellite. Tale metodo neces-

sita però di notevoli risorse di calcolo ed implica il mantenimento di aggiornamenti della versione linearizzata del modello, degli operatori di osservazione e dei loro aggiunti.

Negli ultimi anni, la necessità di dare una migliore rappresentazione dell'errore di *background*, non solo climatologica, ma dipendente anche dalla situazione in atto, ha determinato un progressivo interesse nello sviluppo di tecniche basate anche sull'utilizzo degli *ensemble* (tecniche ibride). Si è così assistito alla diffusione dell'utilizzo di tecniche basate su metodi di *ensemble* all'interno di un approccio di tipo *Kalman Filter* (MENG and ZHANG 2011). Queste metodologie presentano alcuni vantaggi: sono generalmente di facile implementazione e mantenimento, specie se confrontate con i metodi variazionali, consentono di assimilare dati ottenuti da misure non convenzionali, come ad esempio il radar ed il satellite meteorologico, in modo relativamente semplice, e non richiedono l'inclusione di bilanci atmosferici non appropriati ad alta risoluzione. D'altra parte, sono anch'essi sviluppati effettuando ipotesi non sempre verificate per le variabili e per le scale di interesse, e richiedono ingente tempo di calcolo per effettuare l'assimilazione stessa.

Allo scopo di utilizzare al meglio queste nuove tecniche, la ricerca si sta concentrando sulla soluzione dei problemi posti dal loro utilizzo, interessandosi di temi come: la frequenza dell'assimilazione stessa, al fine di utilizzare dati sempre più recenti nella stima dello stato dell'atmosfera; l'utilizzo di metodi per ridurre la dimensione dell'*ensemble* richiesto nel ciclo di assimilazione (metodi di inflazione, metodi di localizzazione); lo sviluppo di operatori per utilizzare osservazioni di variabili non prognostiche del modello (oltre al radar ed al satellite, dati da rete GPS, da antenne per telefoni cellulari, prodotti satellitari di vario tipo, etc). Per una *review* su questi temi si veda HOUTEKAMER, ZHANG 2016.

2.3. Ensemble forecasting

Un problema fondamentale associato alla modellistica numerica previsionale è posto dalla natura caotica dell'atmosfera, che limita la possibilità previsionale del suo stato, ovvero la sua 'predicibilità', e obbliga ad inquadrare la previsione meteorologica in un contesto probabilistico.

Si consideri che la previsione numerica del tempo è stata avviata sulla base del determinismo, che è stato l'assunto di base della Fisica dai tempi di Newton fino alla fine del diciannovesimo secolo. Secondo la sua definizione, lo stato futuro di un sistema è completamente determinato dal suo stato iniziale. Il fatto che l'atmosfera sia un sistema caotico significa che in esso si osserva un'elevata dipendenza del destino del sistema dalla condizione iniziale e cioè traiettorie del sistema che presentano una differenza piccolissima nelle condizioni iniziali possono divergere completamente dopo un tempo sufficiente di integrazione. Tale limite di predicibilità è stato stabilito essere per l'atmosfera dell'ordine delle due settimane (LORENZ 1969; LORENZ 1993).

Pertanto, nonostante i buoni risultati ottenuti, sia a livello operativo che di ricerca, è presto emerso il problema del limite della previsione di tipo deterministico, imposto dalla crescita degli inevitabili errori che affliggono la previsione numerica. Infatti, lo stato iniziale dell'atmosfera è sempre determinato in modo impreciso ed i modelli numerici sono sempre approssimati. Tali errori ineliminabili conducono quindi a limitare la validità della previsione del tempo a orizzonti temporali che variano a seconda della scala spaziale, ma in ogni caso non eccedendo le due settimane.

I primi lavori che hanno portato il tema della predicibilità in un contesto operativo sono quelli di sviluppo dei primi sistemi di *ensemble* globali. In questi sistemi (TRACTON, KALNAY 1993; MOLTENI *et al.* 1996) si integrano i modelli meteorologici globali non una volta ma molte, a partire da condizioni iniziali diverse e rappresentative dei possibili errori nella stima della condizione iniziale stessa, a produrre un insieme di previsioni capaci di descrivere l'incertezza associata alla previsione meteorologica deterministica, ed i possibili scenari alternativi.

In seguito, tale approccio è stato esteso anche ai modelli LAM, considerando principalmente l'incertezza associata alle condizioni al contorno, portando a sistemi di *ensemble* ad alta risoluzione (MARSIGLI *et al.* 2001). Ora l'*ensemble forecasting* è pratica comune e consolidata in tutti i Servizi Meteorologici.

Parallelamente, sono state migliorate le metodologie perturbative per poter descrivere in tali sistemi sia l'incertezza nelle condizioni iniziali, ora spesso rappresentata tramite sofisticati sistemi di *ensemble data assimilation* (HAMILL 2006), sia l'incertezza nella formulazione del modello stesso (BERNER *et al.* 2015).

Recentemente sono stati portati all'operatività in diversi paesi sistemi di *ensemble* alla scala *convection-permitting* di 1-3 km, in modo da ottenere previsioni probabilistiche ad alta risoluzione spaziale e per eventi intensi e localizzati (CLARK *et al.* 2016). Grazie a tali sistemi vengono ora effettuate previsioni probabilistiche di occorrenza di temporali, sviluppo di celle convettive, venti intensi, nebbia.

3. LA COLLABORAZIONE EUROPEA

Per affrontare le sfide che si propongono nell'ambito della modellistica meteorologica previsionale, i Servizi Meteorologici Europei si trovano spesso a collaborare, sia organizzando momenti di incontro e discussione sia avviando progetti di sviluppo condivisi.

Un importante tavolo di collaborazione è quello offerto da EUMETNET, un raggruppamento di Servizi Meteorologici che finanzia e segue progetti sia legati alla raccolta ed all'utilizzo delle osservazioni sia alla componente previsionale, inclusa la modellistica. Il coordinamento in quest'ultimo settore, denominato SRNWP (Short-Range Numerical Weather Prediction, previsioni numeriche meteorologiche a breve termine), permette tra le altre cose di organizzare un

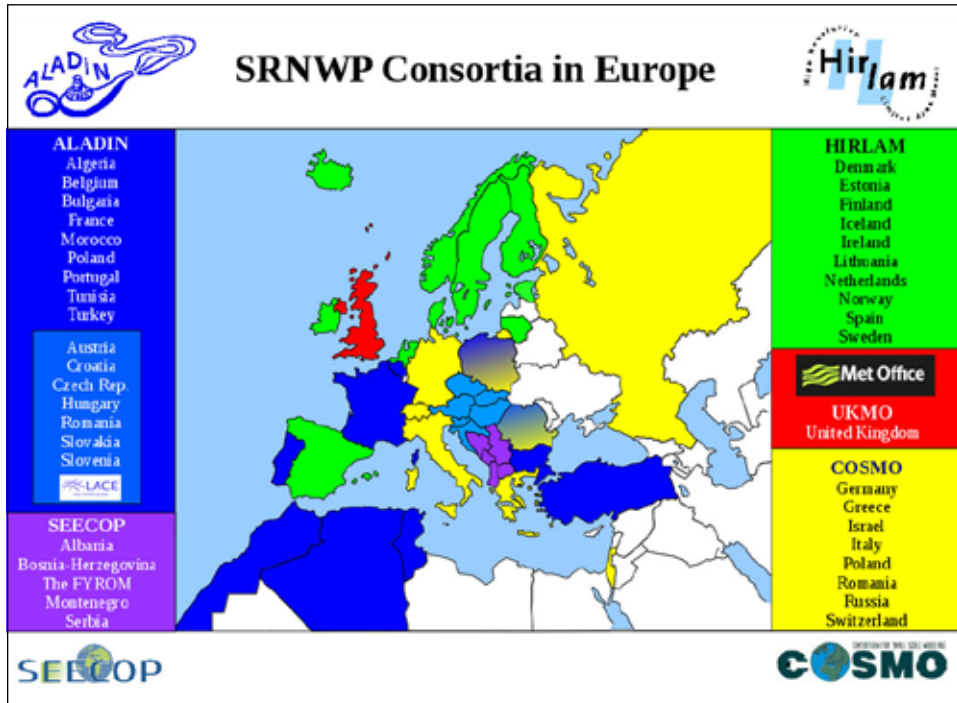


Figura 1. SRNWP Consortia in Europe. La figura mostra una mappa dell'Europa in cui i vari paesi sono colorati a seconda del Consorzio modellistico cui appartengono. I raggruppamenti sono descritti ai lati della mappa, mostrando anche la legenda dei colori.

convegno annuale (EWGLAM, European Working Group on LAM), dove i rappresentanti dei Servizi Meteorologici si trovano per fare il punto sullo stato dell'arte nel settore, presentare i risultati recenti e discutere i problemi ancora aperti.

I Servizi Meteorologici Europei, inoltre, non sviluppano da soli ciascuno il proprio modello LAM, ma hanno creato da diversi anni dei Consorzi di paesi, al fine di sfruttare al meglio le risorse sviluppando i modelli in collaborazione. In figura 1 si riportano i 6 Consorzi modellistici europei, ed è possibile identificare i paesi membri di ciascuno di essi in base al loro colore sulla mappa (figura 1).

I Consorzi sono: Aladin, cosmo, Hirlam, Lace (parte anche di Aladin), SEECOP, Met Office.

L'Italia è membro del Consorzio cosmo (Consortium for Small-scale Modeling), attraverso un accordo internazionale firmato dal Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare, ed in esso collabora allo sviluppo del modello LAM non idrostatico denominato COSMO. A livello nazionale, ReMet, Arpa SIMC e ARPA Piemonte hanno siglato l'accordo LAMI per cooperare alla gestione e allo sviluppo della modellistica nazionale su base operativa utilizzando il modello COSMO. Dal 2004 (DPCM 27/2/2004), LAMI è il sistema nazionale di riferimento a supporto della Protezione Civile Nazionale.

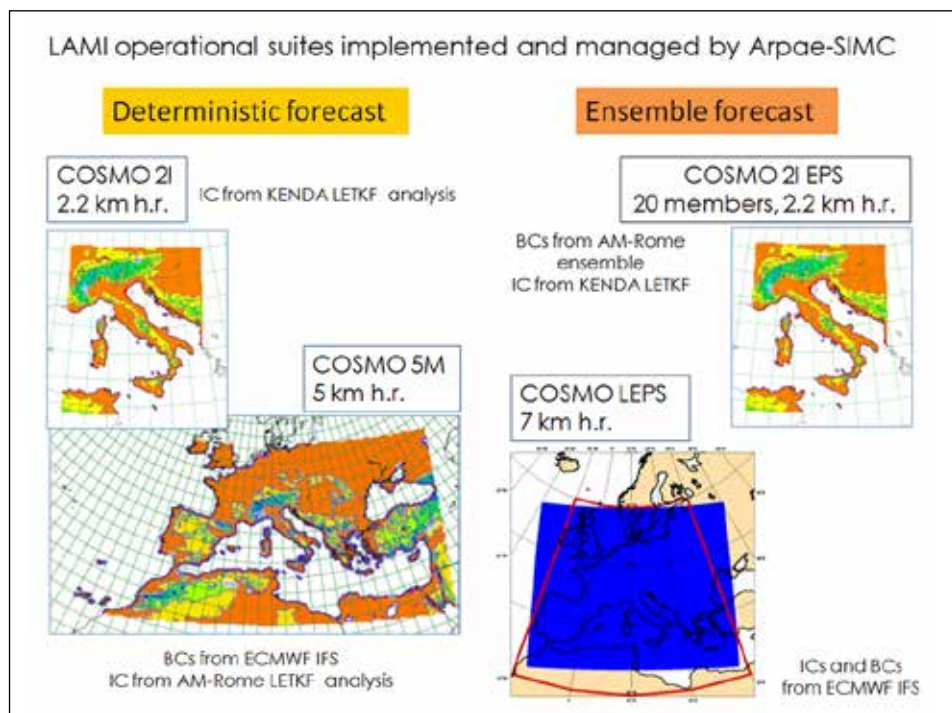


Figura 2. LAMI operational suites implemented and managed by Arpa SIMC. La figura mostra uno schema in cui sono riassunte le componenti del sistema modellistico di Arpa SIMC. Sulla sinistra sono riportate le principali componenti deterministiche (COSMO 5M e COSMO 2I), sulla destra le componenti probabilistiche (COSMO-LEPS e COSMO 2I EPS).

4. L'ITALIA E IL SISTEMA LAMI

Il sistema modellistico operativo denominato LAMI è implementato e gestito da Arpa Servizio Idro Meteo Clima e si articola in diverse componenti.

Attualmente le componenti operative principali sono COSMO 5M, un'integrazione del modello cosmo su un'area Mediterranea ad una risoluzione spaziale di 5 km e con un orizzonte di previsione di 3 giorni, e COSMO 2I, un'integrazione del modello COSMO sull'Italia alla risoluzione spaziale più elevata di 2.2 km e con un orizzonte di previsione di 2 giorni. Per entrambi i sistemi si effettuano due integrazioni al giorno, alle 00 ed alle 12 UTC.

Per fornire la condizione iniziale a COSMO 2I, si effettua anche un ciclo di assimilazione con il sistema KENDA 2I, un ciclo di assimilazione basato su un *ensemble* e che utilizza un metodo denominato LETKF (Localised Ensemble Transform KALMAN FILTER, HUNT *et al.* 2007), implementato nel modello COSMO da SCHRAFF *et al.* 2016. Tale sistema permette di assimilare ad alta risoluzione spaziale (2.2 km) le osservazioni sia convenzionali (da rete SYNOP, da radiosondaggi e misurate da aereo) sia non convenzionali, attualmente in fase di studio. Inoltre, permette di ef-

fettuare un'assimilazione della precipitazione stimata da rete radar nazionale tramite una tecnica denominata Latent Heat Nudging (STEPHAN *et al.* 2008).

La componente a più alta risoluzione COSMO 2I comprende anche un sistema ruc (Rapid Update Cycle), che consiste in 8 integrazioni del modello a 21 ore, alla stessa risoluzione e sullo stesso dominio. Questo aggiornamento della previsione ogni 3 ore permette di sfruttare al meglio le nuove osservazioni raccolte, che vengono assimilate tramite il ciclo di assimilazione KENDA 2I, fornendo così nuove condizioni iniziali che vengono poi utilizzate per avere previsioni il più possibile aggiornate (figura 2).

Tali componenti 'deterministiche' del sistema modellistico sono poi affiancate da due componenti 'probabilistiche': COSMO-LEPS, un *ensemble* di 20 membri con una risoluzione spaziale di 7 km, sviluppato per il Consorzio COSMO da Arpa SIMC e grazie ad esso integrato presso il centro di calcolo di ECMWF, che fornisce previsioni probabilistiche a 5 giorni, e COSMO 2I EPS, il nuovo *ensemble* sull'Italia ad una risoluzione spaziale di 2.2 km, con lo scopo di fornire previsioni probabilistiche ad alta risoluzione in particolare per eventi intensi e ad impatto elevato.

5. PROSPETTIVE FUTURE

Nell'ambito della modellistica numerica previsionale, la sfida attuale si può riassumere nella necessità di sviluppare modelli in grado di fornire previsioni di buona qualità alla scala del chilometro. Ciò implica essere in grado di fornire previsioni con un dettaglio spaziale di uno o pochi chilometri e temporale di una o poche ore che siano affidabili, cioè sulle quali ci si possa basare per prendere decisioni.

Il problema sotteso da tale necessità è che, aumentando la risoluzione del modello, aumenta anche ciò che ad esso si richiede in termini di capacità previsionale, ad esempio una previsione dell'occorrenza di temporali con una risoluzione spaziale sub-regionale ed una risoluzione temporale sub-giornaliera.

Per ottenere ciò, è necessario continuare ad affrontare il problema della *grey zone*, tanto per i modelli globali, che entrano ora nella cosiddetta *grey zone* della convezione, che per i modelli ad area limitata, che si trovano a cavallo tra la *grey zone* della convezione e quella della turbolenza. Inoltre, è ormai accettato che una *grey zone* esisterà sempre, a qualunque risoluzione spaziale, definita dalle scale spaziali coinvolte e dai processi rappresentati in parte esplicitamente ed in parte statisticamente.

È altresì necessario continuare a sviluppare sistemi di assimilazione dati in grado di fornire analisi adeguate alla scala del chilometro, tenendo conto dei bilanci atmosferici propri di quelle scale, ed in grado di trarre il massimo beneficio dalle reti osservative non convenzionali (e.g. rete radar nazionale, satelliti, altri dati legati alle telecomunicazioni). Tutto ciò deve essere fatto in un contesto che tenga conto della predicibilità atmosferica, e dei limiti insiti in una previsio-

ne numerica a qualunque scala. È pertanto necessario inserire i modelli in sistemi di *ensemble*, per affrontare in modo adeguato il calo di predicibilità dovuto all'aumento della risoluzione orizzontale, includendo nei sistemi stessi un'adeguata descrizione delle possibili incertezze del sistema modellistico, così da fornire una previsione dell'errore previsionale.

Bibliografia

- BERNER J., FOSSELL K.R., HA S.-Y., HACKER J.P., SNYDER C. (2015), *Increasing the Skill of Probabilistic Forecasts: Understanding Performance Improvements from Model-Error Representations*, "Monthly Weather Review", 143, pp. 1295-1320.
- BUEHNER M., HOUTEKAMER P.L., CHARETTE C., MITCHELL H.L., HE B. (2010), *Intercomparison of Variational Data Assimilation and the Ensemble Kalman Filter for Global Deterministic NWP. Part I: Description and Single-Observation Experiments*, "Monthly Weather Review", 138 (20), pp. 1550-1566.
- CHARNEY J.G., FJORTOFT R., VON NEUMANN J. (1950), *Numerical Integration of the Barotropic Vorticity Equation*, "Tellus", 2, pp. 237-254.
- CLARK P., ROBERTS N., LEAN H., BALLARD S. P. CHARLTON-PEREZ C. (2016), *Convection-permitting models: a step-change in rainfall forecasting*, "Meteorological Applications", 23, pp. 165-181.
- GERARD L., PIRIOU J., BROŽKOVÁ R., GELEYN J., BANCIU D. (2009), *Cloud and Precipitation Parameterization in a Meso-Gamma-Scale Operational Weather Prediction Model*, "Monthly Weather Review", 137, pp. 3960-3977.
- HAMILL T.M. (2006), Ensemble-based atmospheric data assimilation, in Palmer T., Hagedorn R. (a cura di), *Predictability of Weather and Climate*, Cambridge (UK), Cambridge University Press.
- HOUTEKAMER P.L., ZHANG F. (2016), *Review of the Ensemble Kalman Filter for Atmospheric Data Assimilation*, "Monthly Weather Review", 144, pp. 4489-4532.
- HUNT B. R., KOSTELICH E. J., SZUNYOGH I. (2007), *Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: A local ensemble transform Kalman filter*, "Physica D: Nonlinear Phenomena", 230, pp. 112-126.
- LORENZ E. (1969), *The predictability of a flow which possesses many scales of motion*, "Tellus", 3, pp. 289-307.
- LORENZ E.N. (1993), *The essence of chaos*, Seattle (USA), UCL Press.
- MARSIGLI C., MONTANI A., NEROZZI F., PACCAGNELLA T., TIBALDI S., MOLTENI F., BUIZZA R. (2001), *A Strategy for High Resolution Ensemble Prediction. Part II: Limited area experiments in four Alpine flood events*, "Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society", 127, pp. 2095-2115.
- MENG Z., ZHANG F. (2011), *Limited-Area Ensemble-Based Data Assimilation*, "Monthly Weather Review", 139, pp. 2025-2045.
- MOLTENI F., BUIZZA R., PALMER T.N., PETROLIAGIS T. (1996), *The ECMWF Ensemble Prediction System: methodology and validation*, "Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society", 122, pp. 73-119.
- SCHRAFF C., REICH H., RHODIN A., SCHOMBURG A., STEPHAN K., PERIÁÑEZ A., POTTHAST R. (2016), *Kilometre-scale ensemble data assimilation for the COSMO model (KENDA)*, "Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society", 142, pp. 1453-1472.
- STEPHAN K., KLINK S., SCHRAFF C. (2008), *Assimilation of radar-derived rain rates into the convective-scale model COSMO-DE at DWD*, "Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society", 134, pp. 1315-1326.
- STEIN T.H., HOGAN R.J., CLARK P.A., HALLIWELL C.E., HANLEY K.E., LEAN H.W., NICOL J.C., PLANT R.S. (2015), *The DYMECS Project: A Statistical Approach for the Evaluation of Convective Storms in High-Resolution NWP Models*, "Bulletin of the American Meteorological Society", 96, pp. 939-951.
- TRACTON M.S., KALNAY E. (1993), *Operational ensemble prediction at the National Meteorological Centre: Practical Aspects*, "Weather and Forecasting", 8, pp. 379-398.



LA GRAFICA

Finito di stampare nel mese di giugno dell'anno 2018
presso la TIPOGRAFIA LA GRAFICA EDITRICE
di Vago di Lavagno (Verona) - Italia

lagrificagroup.it