

The background of the page is a topographic map with white contour lines on a brownish-tan background. In the center, there is a small village with several buildings and a road. Below the village, there is a large, irregularly shaped reservoir or lake. The map shows various elevations and geographical features.

La previsione e l'allertamento

3

3.1 La previsione meteorologica

3.1.1 Predicibilità

L'atmosfera è un sistema dinamico con un elevato numero di gradi di libertà ed intrinsecamente caotico. Il suo stato in un dato istante è descritto dalla distribuzione spaziale di vento, temperature, pressione, umidità e altre variabili. Essendo un fluido, l'atmosfera rientra in quella branca della fisica che va sotto il nome di *fluidodinamica* e la sua evoluzione può essere descritta in termini matematici da equazioni analitiche, quali la conservazione della massa, dell'energia e del momento.

Figura 3.1.1
Esempio di copertura dati provenienti da radiosondaggi del WMO (World Meteorological Organization)

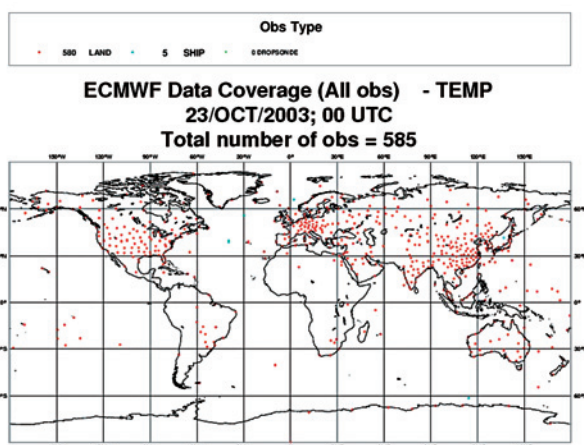
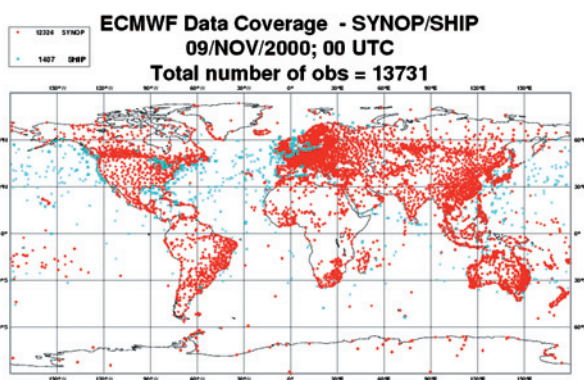


Figura 3.1.2
Esempio di copertura dati provenienti da stazioni di misura al suolo del WMO



Si tratta di equazioni differenziali, la cui soluzione presuppone la conoscenza di un punto di partenza o, matematicamente parlando, condizione iniziale, a partire dalla quale operare un'integrazione nel tempo. Tale condizione iniziale è data da complesse procedure di assimilazione, che producono una stima dello stato dell'atmosfera a partire dalle osservazioni disponibili (la cosiddetta *analisi*). Il fatto che le misure osservate siano disponibili in numero limitato e disuniforme introduce un pesante fattore di incertezza nelle condizioni iniziali, che si ripercuote inevitabilmente sui risultati della previsione, diventando fonte di errore. Per una previsione corretta è inoltre necessario che i modelli siano in grado di riprodurre accuratamente i fenomeni dominanti in atmosfera. Il fatto che essi siano in grado di simulare solo certe categorie di processi, in base alle loro caratteristiche scale spaziali e temporali, è la seconda fonte di errore previsionale.

Infine, nonostante la sorprendente velocità di sviluppo delle risorse informatiche messe a disposizione della comunità scientifica, con computer di anno in anno sempre più potenti e rapidi nel gestire le attività di calcolo, le risorse computazionali costituiscono spesso un limite alla complessità e risoluzione dei modelli numerici e dell'assimilazione dei dati, poiché è necessario raggiungere un compromesso tra accuratezza modellistica e tempo di calcolo richiesto dalla simulazione per finalità operative. Queste tre fonti di errore fanno sì che le previsioni si deteriorino all'aumentare del tempo di previsione. L'incertezza sulle condizioni iniziali, in particolare, non potrà mai essere del tutto eliminata, poiché al limite dato dalla disuniformità della copertura si deve aggiungere l'errore intrinseco dovuto all'accuratezza e sensibilità dello strumento di misura. Questo fa sì che piccole incertezze, legate al sistema osservativo, siano ineliminabili dalle condizioni iniziali. Di conseguenza, anche nell'ipotesi di un sistema di equazioni perfetto, due stati iniziali che differiscano anche di poco tendono a divergere l'uno dall'altro molto rapidamente, all'aumentare del tempo di previsione. Gli errori osservativi si amplificano così fino ad influenzare negativamente l'affidabilità della previsione. Negli ultimi 15 anni l'accuratezza della previsione è migliorata sostanzialmente nei primi 5 giorni, ma la riduzione dell'errore nei giorni successivi è ancora molto contenuta.

L'indirizzo attualmente seguito dalla ricerca scientifica è quello di cercare di risolvere il problema della predicibilità impostando la previsione in termini di probabilità, attraverso il cosiddetto metodo dell'EPS (*Ensemble Prediction System*), che consente di tenere in considerazione la componente caotica del moto atmosferico, non contemplata dai modelli numerici, di per se stessi deterministici. Lorenz (1963) scoprì per primo che, ripetendo la stessa simulazione con valori leggermente diversi, l'evoluzione dell'atmosfera elaborata numericamente si discostava nettamente nei diversi casi. Sulla base di tale esperimento è nata appunto la tecnica di previsione dell'EPS. Esso viene generato producendo un numero elevato di simulazioni che differiscono per le condizioni iniziali, ottenute modificando leggermente quella della simulazione operativa. A ogni scenario ottenuto, che può

differire anche molto dagli altri, viene associata una probabilità; ciò significa che se ad esempio 25 simulazioni su 50 prevedono precipitazione superiore a 20 mm, a tale evento sarà assegnata una probabilità del 50% di verificarsi.

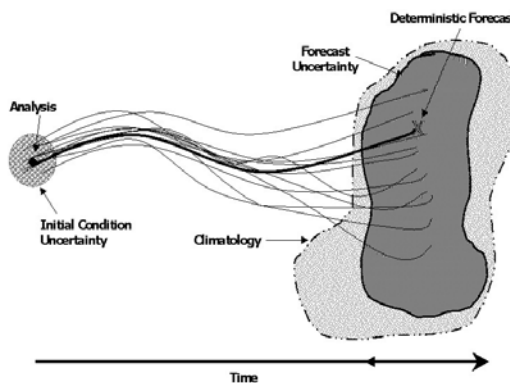
Mentre i modelli ad alta risoluzione hanno dimostrato di essere molto sensibili a piccole variazioni delle condizioni iniziali, l'approccio dato dall'EPS trae un vantaggio da questa incertezza. Tale tecnica è utilizzata presso il servizio meteorologico del Piemonte, che riceve quotidianamente i risultati di un *ensemble* di 51 membri, prodotto dall'ECMWF (*European Centre for Medium-range Weather Forecasts*), per i campi di precipitazione e di temperatura. Tali previsioni, vengono utilizzate per il cosiddetto *medium range forecast*, ovvero le previsioni a medio termine (dal quarto al settimo giorno). Un esempio viene dato nella **figura 3.1.4** che si riferisce alla probabilità di precipitazione relativa ai giorni 15 e 16 ottobre 2000. Tale evento alluvionale fu in effetti previsto con sufficiente anticipo proprio grazie a questo prodotto. Attualmente, in Piemonte, le previsioni a medio termine rivestono una notevole importanza nel bollettino del sistema olimpico per la descrizione della tendenza delle condizioni meteorologiche.

3.1.2 Modelli

Si distinguono due categorie principali di modelli numerici per la previsione del tempo:

- i modelli globali (GCM – *Global Circulation Models*);
- i LAM (*Limited Area Model*) o modelli ad area limitata.

I modelli di circolazione globale (GCM) sono alla base del processo previsionale dei fenomeni atmosferici. Simulano l'evoluzione su scala planetaria, ovvero su tutto il globo, per un'estensione verticale che arriva fino a 30 km dalla superficie terrestre, sebbene l'area di interesse per l'evoluzione del tempo inteso in senso meteorologico sia limitata ai primi 15 km dalla superficie (*Troposfera*). Ciò che rende tale strato atmosferico di peculiare interesse per la meteorologia è la presenza, nella sua composizione, del vapore acqueo; come diretta conseguenza, essa è sede di tutti i fenomeni di cambiamento di fase e flussi di calore che sono alla base degli eventi meteorologici. Avendo un dominio di integrazione vastissimo (l'intero globo), i GCM hanno bassa risoluzione spaziale (dell'ordine delle centinaia di chilometri). Per comprendere il concetto di risoluzione è necessario pensare che, in ambito modellistico, le funzioni continue che rappresentano le diverse variabili dinamiche vengono rappresentate tramite matrici. Queste ultime assumono i loro valori su un dominio, costituito da un insieme di punti nello spazio, i quali costituiscono la cosiddetta griglia del modello.



La risoluzione è data dalla distanza tra due punti contigui: tanto più piccolo è questo intervallo e tanto maggiore è la risoluzione. In base alla risoluzione si può definire il tipo di fenomeni che possono essere simulati correttamente. Di fatto, un modello è in grado di riprodurre realisticamente fenomeni che avvengono su scale dell'ordine del doppio della sua scala caratteristica. D'altra parte, i fenomeni che avvengono nell'atmosfera sono enormemente vari, differendo, oltre che per tipologia, anche per scala spaziale e temporale. Si spazia da quelli cosiddetti di larga scala, che avvengono su scale dell'ordine dei 3'000 km, a quelli di mesoscala, dell'ordine delle centinaia di chilometri, ai fenomeni di brezza e *squall-lines* (decine di chilo-

Figura 3.1.3 Schema dell'evoluzione nel tempo di possibili configurazioni atmosferiche in un modello deterministico. Come si nota, a partire da condizioni iniziali che differiscono anche poco le une dalle altre, al passare del tempo le traiettorie che descrivono l'evoluzione nel tempo dell'atmosfera divergono anche sensibilmente; la distanza tra i punti di arrivo dà una misura dell'incertezza previsionale

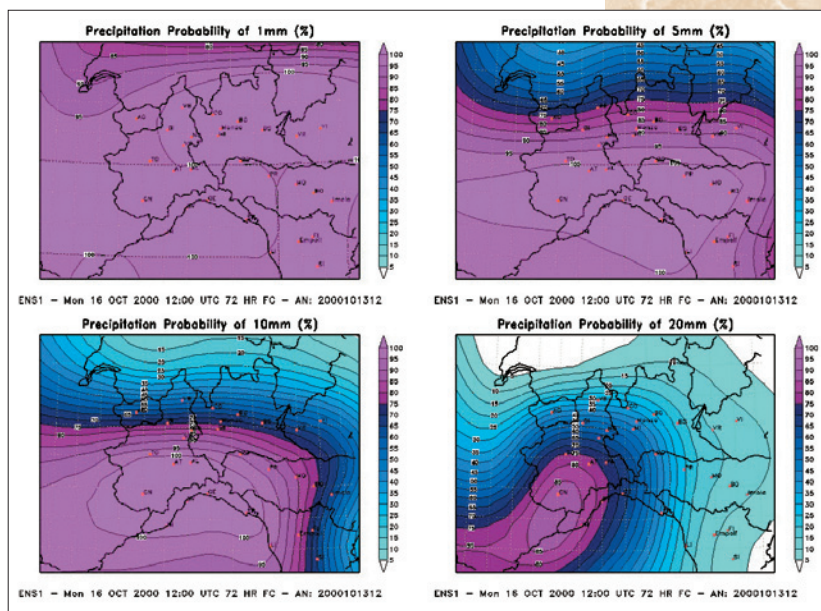
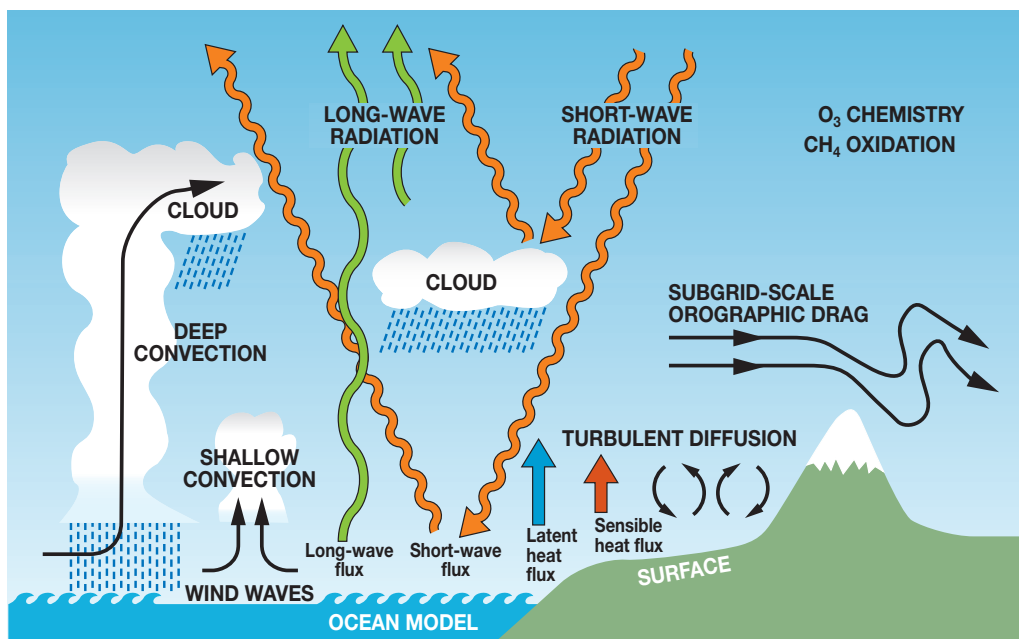


Figura 3.1.4 Probabilità di precipitazione prevista da ECMWF per diverse soglie (1, 5, 10 e 20 mm), fra il 15 e il 16 ottobre 2000

metri), ai fenomeni convettivi (1-2 km), fino ai moti molecolari. I GCM sono in genere in grado di simulare correttamente i fenomeni di larga scala e mesoscala.

I LAM, invece, si limitano a considerare aree più ristrette. Riducendo il dominio di integrazione diminuisce la mole di calcoli a carico del computer e diventa possibile aumentare la risoluzione spaziale del modello (al di sotto dei 40 km), che in tal modo è in grado di descrivere fenomeni che hanno luogo su scale spaziali e temporali più ridotte. I modelli LAM sono usati per simulare fenomeni di mesoscala, che hanno scale caratteristiche non risolte dai modelli a larga scala. In base alla defi-

Figura 3.1.5
Rappresentazione
schematica
dei vari processi
atmosferici



nizione di Orlanski (1975), tali fenomeni riguardano le seguenti scale:

- microscala, inferiore a 2 km (ne sono un esempio i vortici turbolenti);
- meso γ , tra 2 km e 20 km (per esempio la convezione temporalesca e i flussi su orografia complessa);
- meso β , tra 20 km e 200 km (di cui sono un esempio le brezze di mare e di terra);
- meso α , tra 200 km e 2'000 km (ad esempio i sistemi frontali e la formazione di aree di bassa pressione).

I modelli GCM hanno tipicamente un numero di scadenze temporali superiore e sono generalmente utilizzati per le previsioni a medio termine, ovvero dal terzo giorno in poi. I primi tre giorni di previsione sono invece meglio simulati dai modelli ad area limitata. I LAM si suddividono a loro volta in idrostatici e non idrostatici, a seconda della loro risoluzione orizzontale. I primi fanno uso della cosiddetta approssimazione idrostatica, un'equazione che assume un bilancio tra la forza peso e il gradiente di pressione. In tal caso, l'accelerazione verticale non viene calcolata tramite un'equazione esplicita, ma attraverso la differenza di velocità verticali diagnosticate dal modello, imponendo la conservazione della massa. Tale approssimazione è valida su scale orizzontali superiori a 10 km.

I processi non idrostatici diventano importanti quando i moti verticali nell'atmosfera cambiano rapidamente, cioè quando le accelerazioni verticali diventano dello stesso ordine di grandezza di quelle orizzontali, come avviene, per esempio, nel caso dei fenomeni convettivi intensi. Il criterio per utilizzare l'approssimazione idrostatica è dato dal rapporto tra scala verticale (H) e orizzontale (L) del fenomeno in esame: se $H/L \ll 1$ allora tale approssimazione è valida e le accelerazioni verticali sono trascurabili; alternativamente, se $H/L \geq 1$ sia-

mo in condizioni di non idrostaticità ed è necessaria l'introduzione di ulteriori equazioni che descrivano esplicitamente il moto verticale dell'atmosfera. Normalmente i modelli LAM includono effetti non idrostatici quando la loro scala caratteristica è inferiore ai 10 km.

Aumentando la risoluzione, infatti, l'equazione idrostatica risulta non essere adatta a descrivere fenomeni quali alcuni tipi di *lee-waves* o la dinamica dei cumulonembi. Si rende, così, necessario l'utilizzo di un'altra categoria di modelli: i modelli non idrostatici, nei quali il calcolo dell'accelerazione verticale viene fatto esplicitamente.

Il vantaggio in termini di risoluzione offerto dai LAM è, però, limitato dal fatto che, considerando solo un'area ristretta del complesso sistema atmosfera, essi rischiano di dare risultati irrealistici, in quanto evolvono in modo indipendente dal resto. L'ideale sarebbe, ovviamente, quello di disporre di un GCM con risoluzione elevata quanto quella di un LAM; questo, però, come già evidenziato in precedenza, non è consentito dai limiti computazionali dei computer. Per poter coniugare i vantaggi di risoluzione dei LAM e, contemporaneamente, non rinunciare a quelli dei GCM, si ricorre alla cosiddetta tecnica del *nesting* (annidamento). Il meccanismo di base consiste nell'utilizzare il risultato di un modello a bassa risoluzione come condizione iniziale e al contorno per l'esecuzione di una simulazione effettuata con un modello a risoluzione maggiore. Il *nesting* è usato sia per passare da un GCM ad un LAM, sia per affinare ulteriormente i risultati, aumentando la risoluzione dello stesso LAM, in modo telescopico.

Per quanto elevata sia la risoluzione del modello, la complessità dei fenomeni in esame e la straordinaria varietà di scale spaziali e temporali coinvolte fa sì che esista sempre una varietà di processi che il modello numerico non è in grado di simulare o, tecnicamente, risolvere.

Le cosiddette variabili dinamiche dei modelli, ovvero le variabili atmosferiche esplicitamente calcolate sono tipicamente:

- 1) le componenti orizzontali della velocità del vento U e V e, nei modelli non idrostatici, quella verticale W ;
- 2) la temperatura T ;
- 3) l'umidità relativa (o specifica) q ;
- 4) la pressione p .

Tali variabili sono ricavate direttamente dalle equazioni di Navier-Stokes:

$$\begin{aligned} \rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} &= -\nabla p + \rho \mathbf{g} - 2\boldsymbol{\Omega} \times (\rho \mathbf{v}) - \nabla \cdot (\overline{\rho \mathbf{v}' \mathbf{v}'}) \\ \frac{dp}{dt} &= -\left(\frac{C_{pd}}{C_{vd}}\right) \rho \nabla \cdot \mathbf{v} + \left(\frac{C_{pd}}{C_{vd}} - 1\right) Q_h \\ \rho C_{pd} \frac{dT}{dt} &= \frac{dp}{dt} + Q_h \\ \rho \frac{dq^v}{dt} &= -\nabla \cdot \mathbf{F}^v - (I^l + I^f) \\ \rho \frac{dq^{l,f}}{dt} &= -\nabla \cdot (P^{l,f} + \mathbf{F}^{l,f}) + I^{l,f} \\ \rho &= p \left\{ R_d \left(1 + \left(\frac{R_v}{R_d} - 1 \right) q^v - q^l - q^f \right) T \right\}^{-1} \end{aligned} \quad (3.1.1)$$

dove ρ è la densità dell'aria, \mathbf{v} la velocità vettoriale, \mathbf{g} l'accelerazione di gravità, $\boldsymbol{\Omega}$ la velocità angolare terrestre e i termini contrassegnati da apici rappresentano termini turbolenti non risolti esplicitamente dal modello; C_{pd} rappresenta il calore specifico a pressione costante dell'aria secca, C_{vd} il calore specifico a volume costante, Q_h il flusso di calore, q l'umidità specifica (gli apici si riferiscono ai suoi vari stati: vapore, liquido, solido), I rappresenta i processi microfisici di formazione delle nubi e della precipitazione mentre \mathbf{F} è il flusso evaporativo e P quello precipitativo, T la temperatura e R_d la costante dei gas per aria secca mentre R_v quella per vapore. Tali equazioni prognostiche costituiscono la dinamica del modello.

Altri campi meteorologici, come la precipitazione, la copertura nuvolosa, i flussi radiativi e di quantità di moto nel *planetary boundary layer*, non sono calcolati direttamente, bensì in forma indiretta, dal modello numerico, tramite la parametrizzazione. Essa consiste nell'esprimere l'evoluzione dei processi che avvengono su scale più piccole di quelle risolte dal modello, anziché attraverso le formule matematiche che ne descriverebbero l'evoluzione, ma che richiederebbero calcoli più fini di quelli effettuabili dal modello, attraverso espressioni empiriche, ricavate, cioè, da osservazioni dirette. Ciò significa che, basandosi su andamenti osservati da campagne di misura dirette, si stabilisce una correlazione tra la grandezza in esame ed una o

più variabili dinamiche del modello, in modo che la variazione della prima venga espressa in funzione di quella delle seconde.

Un esempio di parametrizzazione è dato nell'equazione seguente, da un'espressione per il calcolo del flusso di quantità di moto τ (Wu, 1982):

$$\tau = \rho_{aria} C_D U_{10}^2 \quad (3.1.2)$$

dove ρ_{aria} rappresenta la densità dell'aria, U_{10} rappresenta il modulo del vento previsto dal modello a 10 m e C_D è una costante (coefficiente di *drag*) il cui valore è espresso dalla seguente formula, ancora una volta in funzione di U_{10}

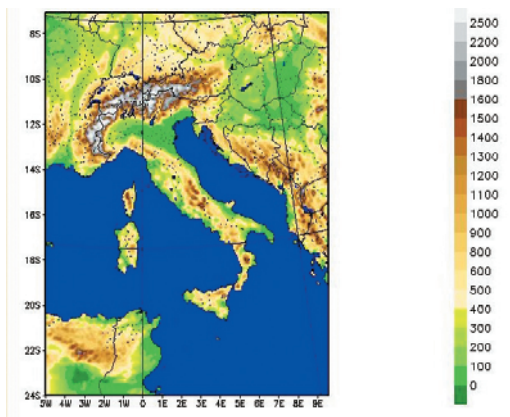
$$C_D = 10^{-3} (0.8 + 0.065 \cdot U_{10}) \quad (3.1.3)$$

In tal modo, anziché l'equazione esplicita per l'evoluzione nel tempo del flusso di quantità di moto, il modello numerico usa una formula che lo descrive in funzione di variabili dinamiche (nel caso specifico la velocità del vento a 10 m).

Un ulteriore punto di discussione sui modelli riguarda la loro inizializzazione. Sia i GCM sia i LAM, infatti, possono tenere conto di alcuni valori osservati all'interno del loro dominio di integrazione. Tramite differenti tecniche di assimilazione dati viene creato un campo di analisi riferito all'istante in cui il modello parte. Tanto più affidabile e dettagliata è questa analisi, quanto più si evita il problema del cosiddetto *spin up*, ossia lo scostamento iniziale che un modello ha con la realtà. Per quanto riguarda i LAM, in pratica, si indica con *cold start* l'utilizzo di un'analisi derivante da un modello globale e ciò comporta che il modello locale costruisca lentamente la circolazione atmosferica. Possono esserci anche oscillazioni nei primi istanti temporali, con le quali il modello assesta le condizioni al bordo che non sono consistenti con la sua dinamica interna; con il *warm start* invece, i modelli usano anche un sistema di assimilazione dei dati osservati per creare un'analisi. Questi dati osservati sono inglobati in maniera omogenea (sia nello spazio che nel tempo, tramite opportune funzioni peso) nel modello, in modo da preservare la sua consistenza interna.

Presso il Centro Funzionale decentrato di Arpa Piemonte, vengono utilizzati operativamente il modello globale IFS di ECMWF, che viene distribuito tramite il centro meteorologico nazionale dell'Aeronautica Militare ed il modello *Lokal Modell* nella sua versione italiana chiamata LAMI (*Local Area Model Italy*) che viene sviluppato nell'ambito del progetto COSMO (*COnsortium for Small-scale MOdelling*, www.cosmo-model.cscs.ch) a cui partecipano i servizi meteorologici nazionali di Italia, Germania, Svizzera, Grecia e Polonia, più alcuni centri locali tra cui Arpa Piemonte e Arpa SIM (Emilia Romagna). Tra questi enti, infatti, esiste una convenzione nel cui ambito si provvede al man-

Figura 3.1.6
Dominio del LAMI
con altezza
dell'orografia



tenimento del modello operativo ed al suo sviluppo. Dal febbraio 2001 il modello produce quotidianamente le previsioni grazie alle simulazioni numeriche che vengono effettuate al centro di calcolo scientifico CINECA di Bologna. La configurazione attuale è la seguente:

- dominio che copre il territorio nazionale;
- 7 km di risoluzione orizzontale;
- 35 livelli verticali;
- 72 ore di previsione;
- *output* ogni 3 ore;
- 2 corse al giorno (00 UTC e 12 UTC);
- condizioni iniziali ed al contorno prese dal modello globale tedesco GME;
- assimilazione iniziale di parametri in quota ma non in superficie nelle 12 ore precedenti l'inizio della corsa.

Il modello utilizza come variabili ricavate direttamente (prognostiche) le componenti longitudinale e latitudinale della velocità, la componente verticale della velocità, la temperatura, la perturbazione della pressione da uno stato di riferimento, l'umidità specifica, il contenuto di acqua nelle nubi; le variabili calcolate in un secondo tempo (diagnostiche) sono, invece, la densità totale ed il flusso delle precipitazioni di pioggia e neve. È presente un sistema di coordinate geografiche ruotate equispaziate nella direzione orizzontale ed un sistema di coordinate generalizzate verticali che

tiene conto delle quote superficiali definendo livelli verticali più vicini in corrispondenza di orografie molto ripide. Viene usato uno schema spaziale alle differenze finite del secondo ordine con variabili definite in orizzontale su una griglia del tipo *Arakawa C* ed in verticale su una griglia di *Lorentz*. L'avanzamento nel tempo avviene secondo uno schema del secondo ordine del tipo *Leapfrog*, cioè esplicito, nella direzione orizzontale ed implicito in quella verticale. Le condizioni iniziali e al bordo sono ricavate dai dati interpolati opportunamente da un modello globale con risoluzione orizzontale maggiore e dominio di integrazione più ampio rispetto a quello del LAM. Lo schema di convezione è quello classico di *Tiedtke*.

Sono inoltre utilizzati a scopo di ricerca anche il modello GME (modello a circolazione globale tedesco) e le versioni svizzera (chiamata aLMo) e tedesca (LM-DWD) di *Lokal Modell*. La differenza fra le diverse versioni di LM sono riportate nella **tabella 3.1.1**.

3.1.3

Previsione e validazione: l'importanza del feedback

La verifica delle previsioni, in particolare della QPF (*Quantitative Precipitation Forecast*), è uno degli aspetti importanti delle attività di un Centro Funzionale perché permette di conoscere il comportamento del modello nelle diverse situazioni meteorologiche, evidenziarne le caratteristiche sistematiche, valutarne l'affidabilità, sia in termini medi che estremi, sia su lunghi periodi che nella situazione corrente. Un buon metodo di verifica rappresenta un feedback a vari livelli del sistema di allertamento nel suo complesso e permette non solo di capire dove intervenire per apportare miglioramenti, ma, soprattutto dal punto di vista del Centro Funzionale, utilizzare al meglio i campi previsti dal modello in funzione dell'obiettivo previsionale.

Al fine di verificare la bontà di un qualunque modello previsionale è necessario disporre del maggior numero possibile di dati osservati, in modo

TABELLA 3.1.1 DIFFERENZA FRA LE DIVERSE VERSIONI DI LM

LM CONFIGURATIONS	ARPA	DWD	METEOSWISS
Domain Size (grid points)	234 x 272	325 x 325	385 x 325
Grid Spacing (horizontal)	0.0625° (7 km)	0.0625° (7 km)	0.0625° (7 km)
Number of Layers	35	35	45
Time Step	40 sec	40 sec	40 sec
Forecast Range	72 hrs	48 hrs	72 hrs
Initial Time of Model Runs	00,12 UTC	00,12,18 UTC	00,12 UTC
Lateral Boundary Conditions	GME	GME	IFS
LBC Update Frequency	1 hr	1 hr	3 hr
Initial State	Nudging Scheme	Nudging Scheme	Nudging Scheme
External Analysis	None	SST, Snow Depth, Soil Moisture Analysis	Snow Depth from DWD

da effettuare un confronto su un periodo di tempo sufficientemente lungo e su un'area sufficientemente ampia per poter essere considerato un valido campione statistico. Per ridurre i problemi di rappresentatività nella verifica di modelli alla mesoscala, è auspicabile esaminare dati meteorologici dettagliati come quelli forniti da stazioni non-GTS ad alta risoluzione anche integrati con quelli prodotti dal radar. Per la validazione delle previsioni Arpa Piemonte utilizza i dati osservati delle circa 400 stazioni automatiche al suolo che gestisce (figura 3.1.7), i dati disponibili nell'ambito del progetto COSMO relativi al nord Italia (figura 3.1.8) e i dati osservati dalla rete al suolo afferenti al sistema dei Centri Funzionali e attualmente disponibili presso il Dipartimento di Protezione Civile (figura 3.1.7).

La qualità del campo di precipitazione previsto è valutata in base a indici statistici che si basano sulle tabelle di contingenza, tabelle a doppia entrata in cui, fissata una determinata soglia di precipitazione accumulata in un certo intervallo temporale, si vanno a valutare il numero di casi previsti e osservati che superano tale soglia nel seguente modo, dove:

- A è il numero di casi in cui l'evento (ovvero il valore di precipitazione superiore alla determinata soglia) non è stato né previsto né osservato;
- B è il numero di casi in cui l'evento è stato previsto ma non osservato (falso allarme);
- C è il numero di casi in cui l'evento osservato non è stato previsto (mancato allarme);
- D è il numero di casi in cui l'evento osservato è stato previsto (previsione corretta).

		PREVISTI	
		NO	SI
OSSERVATI	NO	A	B
	SI	C	D

Dai valori di cui sopra sulle zone di allerta, si calcolano gli indici di qualità classici (BIAS che indica l'errore di sovrastima o sottostima, ETS che indica l'errore di localizzazione spazio-temporale, FAR che dà il numero di falsi allarmi, HRR che rappresenta il numero di successi), sia sul lungo periodo, per valutare l'affidabilità media del modello, sia stagionalmente, per valutare l'andamento in funzione delle caratteristiche climatiche e fenomenologiche diverse e delle modifiche che il modello, in continua evoluzione, subisce periodicamente.

Per ulteriori approfondimenti circa gli indici standard si può far riferimento a Stanski *et al.* (1989), Wilks (1995), Ebert & McBride (1997, 2000). Nella **tabella 3.1.3** sono riportati le definizioni ed il valore ideale degli indici statistici classici. Nelle pagine che seguono sono riportati alcuni dei risultati che sono stati raggiunti nell'ambito del lavoro di verifica della previsione della pre-

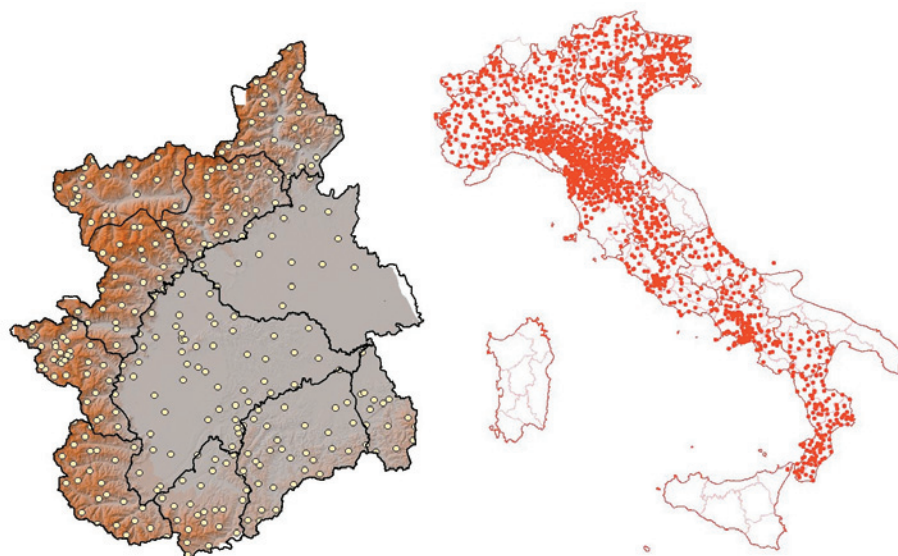


Figura 3.1.7
Distribuzione delle stazioni automatiche e zone di allerta in Piemonte (a sinistra) e pluviometri disponibili presso il Dipartimento di Protezione Civile (a destra)

TABELLA 3.1.3 DEFINIZIONI E VALORE IDEALE DEGLI INDICI STATISTICI CLASSICI

$$BIAS = \frac{B + D}{C + D} \quad \text{BIAS ideale} = 1$$

$$FAR = \frac{B}{B + D} \quad \text{FAR ideale} = 0$$

$$HRR = \frac{D}{C + D} \quad \text{HRR ideale} = 1$$

$$ETS = \frac{D - hits_{random}}{(B + C + D) - hits_{random}}$$

dove

$$hits_{random} = \frac{(B + D)(C + D)}{(A + B + C + D)} \quad \text{ETS ideale} = 1$$

cipitazione areale del modello non idrostatico *Lokal-Modell*, sviluppato nell'ambito del progetto COSMO la cui versione italiana, denominata LAMI, è il modello ad area limitata di supporto al Dipartimento di Protezione Civile. Inoltre è oggetto di verifica il modello a scala globale del Centro Europeo per le Previsioni a Medio Termine (ECMWF) e la previsione numerica soggettiva dei previsori in Arpa Piemonte.

Nei lavori di Oberto *et al.* (2003) e Milelli *et al.* (2003) è stata esaminata la dipendenza delle performance della previsione della precipitazione areale del modello LAMI in funzione delle caratteristiche della zona, in particolare della sua dimensione. Si sono cercati i possibili diversi risultati a seconda che l'*output* del modello sia mediato su *box* di aree diverse (0.25° x 0.25°, 0.50° x 0.50°, 0.75° x 0.75°) o su zone di allerta. In questi studi che riguardano le zone di allerta della rete piemontese, sono state otte-

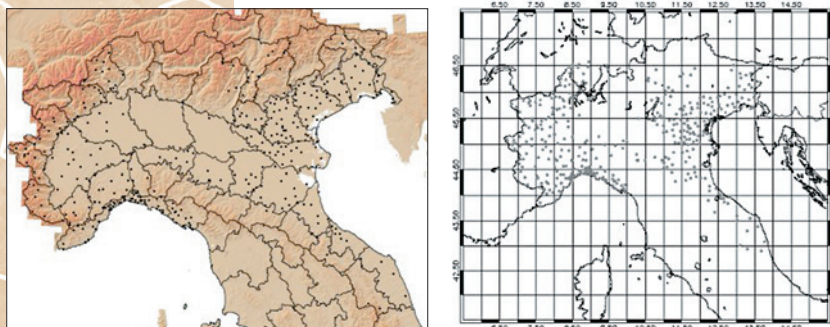


Figura 3.1.8
A sinistra
suddivisione in aree
di allertamento
(circa 3'000 km²);
a destra
suddivisa in box
(circa 50 km di lato)
rete osservativa
disponibile nell'ambito
del progetto COSMO

nute performance diverse a seconda delle aree. Proseguendo il lavoro con le aree di allertamento di prima ipotesi del Nord Italia e il *network* osservativo disponibile nell'ambito del progetto COSMO (figura 3.1.8) si sono confermati i suddetti risultati (figura 3.1.9).

Il BIAS delle previsioni quantitative di precipitazione del modello LAMI per soglie maggiori di 35 mm/24h indica minor sovrastima per le QPF mediate per zona di allerta mentre l'indice ETS sottolinea miglior accuratezza per ogni soglia considerando le aree rispetto alle box. Le QPF sulle zone di allerta mostrano risultati migliori rispetto a QPF calcolate su box di dimensioni confrontabili alle zone. Questo risultato rappresenta un importante feedback positivo: i criteri di definizione delle zone di allerta sono validi per ottenere performance migliori nelle previsioni quantitative di precipitazione.

Per valutare i miglioramenti nell'analisi di tipo soggettivo nella quantificazione del dato di precipitazione si confrontano gli *skill* delle previsioni soggettive (PSA, Previsione Sulle Aree) con quelli del modello LAMI. La figura 3.1.10 mostra gli andamenti al variare della soglia dei vari indici statistici, relativamente alla media areale sulle 24 ore del

secondo giorno di previsione (+24/+48 ore di previsione) ed al periodo compreso tra gennaio 2003 e ottobre 2004. In questa analisi è possibile effettuare il test di ipotesi sviluppato da Hamill (1999) in cui si calcola un intervallo di confidenza con il metodo denominato *bootstrap* per stabilire la reale differenza tra *skill score* di due modelli.

La barra d'errore nella figura 3.1.10 indica i percentili di ordine 2.5 e 97.5 della distribuzione ricampionata assegnata al modello di riferimento. Si nota che il test in questione è simmetrico: il modello di riferimento può essere il modello competitore e viceversa. La differenza di performance è statisticamente significativa se lo *skill score* del modello competitore è all'esterno di un dato intervallo di confidenza (in questo caso 95%) della distribuzione ricampionata.

Dalla figura 3.1.10 si deduce che entrambe le previsioni sovrastimano le QPF, in particolare il PSA per basse soglie (inferiori a 4 mm/24h); non ci sono differenze significative per soglie superiori a 8 mm/24 h in termini di BIAS, mentre per soglie superiori ai 16 mm/24h il PSA è più accurato del LAMI (indice ETS).

In conclusione, riferendosi anche ai lavori più recenti sulla verifica (Turco *et al.*, 2005), si riporta una sintesi dei risultati di carattere generale che sono stati raggiunti nell'ambito del lavoro di validazione:

- nonostante il generale miglioramento dei modelli a scala globale e ad area limitata e al fatto che la risoluzione sia cresciuta notevolmente negli ultimi anni, la QPF prodotta dai modelli meteorologici non è migliorata in maniera così netta da poterla utilizzare direttamente: la previsione soggettiva della QPF rimane quella più performante;
- su regioni con orografia complessa (special-

Figura 3.1.9
BIAS (a sinistra)
e ETS (a destra)
per previsioni quantitative
del modello
LAMI (corsa delle 12 UTC)
mediate su zone di allerta
o box di 50 km di lato
(figura 3.1.8)
relative al periodo
giugno 2002 - agosto 2003

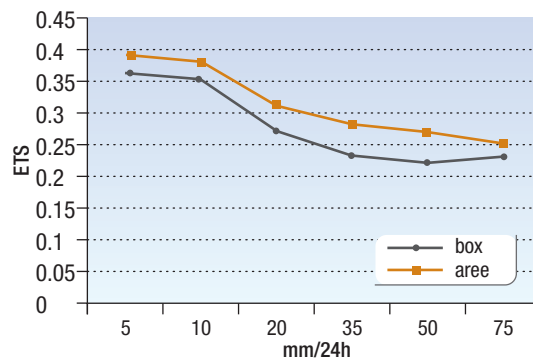
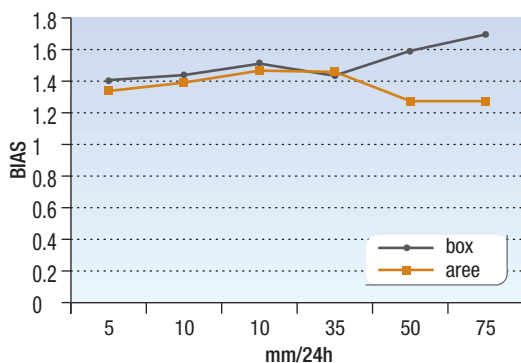
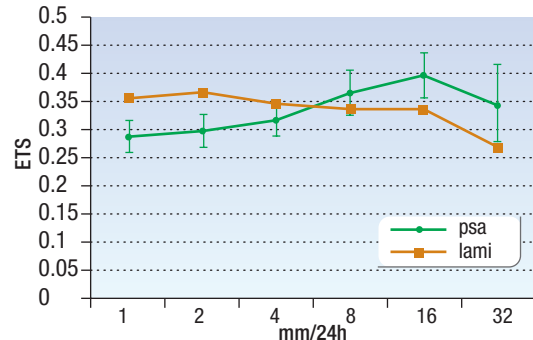
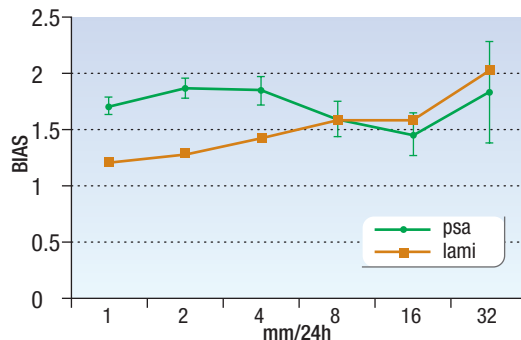


Figura 3.1.10
Andamento degli indici
BIAS e ETS in funzione
della soglia
delle QPF prodotte
soggettivamente (PSA),
dal LAMI



mente per quanto riguarda i rilievi alpini), il *pattern* di precipitazione previsto non è ancora soddisfacente; in particolare si ha sovrastima nel massimo di precipitazione nel versante sopravvento e sottostima in quello sottovento (questo effetto è più pronunciato in inverno che in estate);

- generalmente le corse delle 12 UTC presentano *skill* migliori rispetto alle corse delle 00 UTC. Infatti l'analisi stessa delle 12 UTC può contare su un ciclo di assimilazione dei modelli a grande scala più lungo e le osservazioni disponibili sono in numero maggiore. Inoltre l'inizializzazione del modello da uno stato maggiormente energetico (12 UTC) permette di rappresentare meglio l'innesco delle precipitazioni, consentendo una maggiore destabilizzazione dell'atmosfera;
- si riscontra la tendenza dei modelli ad avere le performance peggiori nel periodo estivo;
- si osserva in generale che le performance diminuiscono al crescere della soglia, cioè lo *skill* della previsione diminuisce per le piogge intense. Questo risultato tuttavia risente anche di un minor numero di dati relativi alle soglie alte, che rende quindi la statistica meno significativa;
- esiste un ciclo diurno dell'errore, in particolare è evidente il peggioramento con il *forecast time*; inoltre si evince una periodicità degli *skill* di 24 con valori di BIAS maggiori nelle ore centrali della giornata;
- considerando più del 60% del territorio italiano, si può asserire che il LAMI sovrastima nella maggior parte delle zone considerate, specie in quelle alpine mentre il modello di ECMWF sottostima nella maggior parte delle aree, specie in quelle costiere;
- le nuove configurazioni introdotte (ad esempio l'analisi di umidità al suolo, lo schema per la precipitazione prognostica, la correzione di alcune variabili previste tramite l'assimilazione di osservazioni GTS attraverso la tecnica del *Nudging*) nelle versioni operative del *Lokal-Modell* hanno apportato miglioramenti significativi nelle QPF.

In riferimento al processo di verifica dell'utilizzo quantitativo della previsione meteorologica nel sistema di allertamento di Arpa Piemonte le maggiori conclusioni sono:

- il valore aggiunto nell'analisi di tipo soggettivo nel fornire la QPF riferita alle zone di allertamento è significativo: la performance della QPF del sistema di allertamento è complessivamente buona;
- le QPF prodotte dai modelli meteorologici sulle zone di allerta mostrano risultati migliori rispetto a QPF calcolate su box di dimensioni confrontabili alle zone. Questo risultato rappresenta un importante feedback positivo: i criteri di definizione delle zone di allerta sono validi per ottenere performance migliori delle QPF;
- è difficile determinare dei trend sistematici di lungo periodo (nel sistema di allertamento piemontese le previsioni quantitative di precipitazione sulle aree di allertamento vengono emes-

se quotidianamente a partire da marzo 2000) rispetto alle performance della QPF soggettiva data la grande variazione annuale nella prevedibilità e nella quantità della precipitazione;

- si hanno performance migliori per soglie di 10 mm/24 h che per 1 mm/24 h; generalmente è più difficile infatti ottenere buone performance per le previsioni di piogge deboli e locali, che i modelli riescono difficilmente a riprodurre, mentre sono previsti con maggiore precisione gli eventi di precipitazione più consistenti legati a forzanti sinottiche;
- le previsioni quantitative di precipitazione sulle aree di allertamento presentano sovrastima decrescente considerando le zone alpine a nord, poi le aree sud e infine in pianura, dove si ha la miglior localizzazione spazio-temporale.

3.1.4

Prospettive e tecniche di miglioramento della previsione meteorologica

Un modello meteorologico non è uno strumento statico ed immobile nel tempo, ma un sistema dinamico che si evolve in funzione delle più recenti innovazioni della scienza e della tecnica. I metodi di miglioramento di un modello si possono distinguere in due categorie:

- 1) agendo dall'interno tramite lo sviluppo di nuovi schemi di parametrizzazione, nuovi schemi numerici, un aumento della risoluzione spazio-temporale o inserendo migliori tecniche di assimilazione dati;
- 2) agendo dall'esterno con tecniche di *post-processing* applicate all'uscita diretta del modello.

Per quanto riguarda lo sviluppo di nuovi schemi, nell'ambito del progetto Interreg IIIB *Hydroptimet*, il modello è stato testato su alcuni eventi di pioggia intensa che hanno interessato il Piemonte. In particolare viene qui preso in considerazione il caso del 25 novembre 2002 (Milelli & Mercogliano, 2005). Sono state effettuate diverse simulazioni che differiscono dalla simulazione di riferimento (nominata semplicemente *s4*) per cambiamenti o di parametrizzazione di alcuni processi fisici o di schemi numerici. Lo scopo è di evidenziare quali di questi schemi influenzano maggiormente la previsione della pioggia. I risultati ottenuti dalle diverse simulazioni sono principalmente analizzati in termini di confronto tra valori di precipitazioni previsti e osservati sulle aree di allertamento del Piemonte.

In particolare sono stati cambiati: lo schema di convezione, il valore del filtro di Raymond applicato sulla quota orografica e il numero di livelli verticali definiti nel modello; inoltre, sono state introdotte, ulteriori variabili prognostiche cioè la fase ghiaccio nelle nubi (prodotta per sublimazione del vapore acqueo) e la precipitazione di pioggia e di neve.

Il set di simulazioni prodotte è dato dal seguente schema:

TABELLA 3.1.4 ELENCO DELLE PROVE EFFETTUATE

S4	Riferimento
S5	Senza filtro orografico
S6	Filtro orografico più forte
S7	Con fase ghiaccio e neve calcolata prognosticamente
S8	Con tutte le fasi dell'acqua calcolate prognosticamente
S9	Schema convettivo di Kain Fritsch
SA	Senza schema convettivo
SB	45 livelli verticali senza filtro orografico
SC	45 livelli verticali senza filtro e tutte le fasi dell'acqua calcolate prognosticamente
SD	45 livelli verticali senza filtro e fase ghiaccio e neve calcolate prognosticamente

Dai risultati ottenuti con questo set di simulazioni, limitatamente a questo caso studio, risulta che la parametrizzazione che ha maggiori effetti sulla localizzazione e sui quantitativi di pioggia previsti è la definizione delle nuove variabili prognostiche. Questo in particolare è vero in una zona con orografia complessa in cui diviene fondamentale l'esatta considerazione dell'avvezione della precipitazione attraverso i rilievi. I risultati in questa configurazione risultano ulteriormente migliorati aumentando il numero di livelli verticali.

Il modello meteorologico operativo presso Arpa Piemonte ha una risoluzione di circa 7 km, ma in principio può produrre risultati ad una risoluzione più alta, ferma restando la necessità in tal caso di alcuni cambiamenti sostanziali nelle equazioni che descrivono i fenomeni fisici. Una possibilità (da un punto di vista puramente numerico) per aumentare la risoluzione del modello è quella di usare un approccio a multiscala, ovvero griglie multiple a risoluzioni spaziali (e temporali) che possono variare anche di ordini di grandezza e che si trasmettono informazioni le une con le altre. Il vantaggio è un'interazione dinamica tra scale diverse a costo computazionale ridotto, una migliore rappresentazione della geometria del dominio e delle forzanti fisiche, una migliore conservazione della massa, una

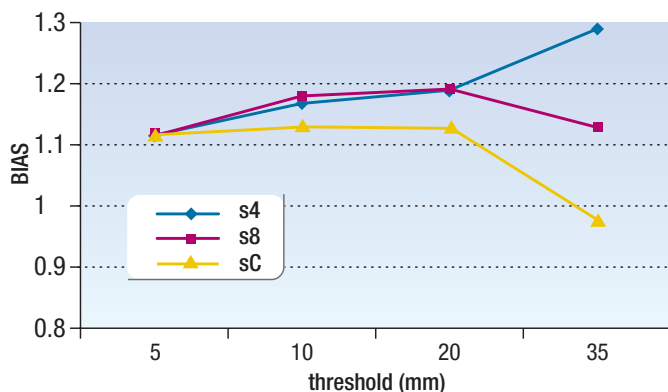
simulazione più accurata e robusta di fenomeni dinamici di piccola scala, con miglioramento anche della simulazione di grande scala. Per questo motivo, è partita una fase di test con esperimenti numerici ed applicazioni a casi rilevanti per le simulazioni olimpiche. In pratica la finalità di questo lavoro, tuttora in progresso, è di ottenere previsioni ad altissima risoluzione (fino ad 1 km) utilizzando delle tecniche innovative di raffinamento di griglia.

Dal punto di vista della modellistica meteorologica e della sua applicazione, la prospettiva è quella di arrivare, nei prossimi anni, ad una risoluzione operativa dell'ordine del chilometro su aree sufficientemente grandi da rappresentare fenomeni come la formazione e propagazione delle nubi temporalesche. Oltre ad aumentare la risoluzione per permettere di descrivere i moti turbolenti con sempre maggiore dettaglio, è necessario affinare la descrizione di quei processi fisici che avvengono nell'atmosfera e alla superficie terrestre e che determinano gli scambi di energia e la trasformazione dell'acqua nelle sue diverse fasi. Per questo occorre mettere a punto altre tecniche di parametrizzazione che oggi sono tra le più studiate a livello di ricerca sul campo. L'analisi dell'interazione dei parametri geomorfologici superficiali (sia i fattori meteo-climatici sia i parametri inerenti la vegetazione ed il suolo) con lo strato superficiale dell'atmosfera, con particolare riferimento ai processi di interazione aria-terra e geosfera-biosfera dal punto di vista idrologico, può essere condotta con l'ausilio di modelli SVAT (*Soil Vegetation Atmosphere Transfer*). Tali modelli simulano i processi fisici all'interfaccia suolo-atmosfera, riproducendo i bilanci energetici ed idrici.

Arpa Piemonte utilizza un modello SVAT per le applicazioni operative agro-meteorologiche, in particolare LSPM (*Land Surface Process Model*), sviluppato presso l'Università di Torino (Loglisci *et al.*, 2001). La struttura di LSPM può essere così schematizzata: il dominio spaziale è limitato in alto da un livello di riferimento nell'atmosfera sopra la vegetazione ed in basso dallo strato di terreno sottostante il sistema radicale delle piante. Nell'atmosfera, i parametri al contorno sono: temperatura, umidità, vento, radiazione globale, pressione e precipitazione dell'aria all'altezza della vegetazione. La vegetazione è considerata come uno strato uniforme (approssimazione *big-leaf*) sia nell'atmosfera che nel sottosuolo, mentre il suolo può essere suddiviso in tre o più strati (a scelta dell'utente). Entrambi sono descritti da una serie di parametri fisici.

Il modello LSPM assume che la precipitazione che arriva al suolo si infilti (infiltrazione) parzialmente nel primo strato di suolo fino alla sua saturazione (la parte di acqua eccedente scorre via per *run off*), e che le radici estraggano umidità dagli strati di suolo che contengono le radici (traspirazione). I flussi di calore sensibile e latente vengono

Figura 3.1.11
BIAS medio sul Piemonte
dalle 00 UTC
del 25/11/02
alle 00 UTC
del 26/11/02
per diverse
configurazioni
del modello
meteorologico



calcolati secondo la formulazione dell'analogia con i circuiti elettrici. Le uscite tipiche del modello sono: radiazione netta, flussi di calore, temperatura ed umidità nel sottosuolo, nell'aria ed a livello della vegetazione. L'utilizzo del modello sopra descritto è importante per la previsione di variabili fisiche non facilmente misurabili, ma di fondamentale importanza dal punto di vista agricolo, come il contenuto di umidità o la temperatura del suolo e trova applicazione nella previsione, ad esempio, di gelate tardive e precoci o dell'instaurarsi delle condizioni agro-meteorologiche critiche per la crescita di particolari parassiti delle piante.

Il futuro della ricerca nel campo della matematica applicata alla meteorologia è, inoltre, anche legato alle tecniche di assimilazione dei dati meteorologici che sono rivolte all'utilizzo ottimale di tutti i dati di osservazione dell'atmosfera che ogni giorno provengono da stazioni fisse e mobili, palloni sonda, aerei, navi, boe, satelliti. Utilizzare al meglio tutte queste osservazioni, soprattutto quelle da satellite, che pur essendo affette da notevoli errori di precisione sono molto dense nello spazio e nel tempo, richiede strumenti matematici che si basano su versioni particolari degli stessi modelli previsionali e su algoritmi cosiddetti variazionali. Per risolvere tali problemi occorre una potenza di calcolo molto maggiore di quella utilizzata per far correre un modello meteorologico.

Soltanto mediante l'utilizzo di tali sistemi di assimilazione si sono potute sfruttare al meglio certe osservazioni come quelle da satellite. I satelliti, infatti, effettuano moltissime misure della radianza proveniente dalla superficie sottostante, dalle quali è possibile derivare indirettamente stime di temperatura ed umidità dell'atmosfera. Per molti anni queste misure remote sono state di utilità limitata, perché difficili da tradurre in informazioni che fossero utili alla previsione atmosferica; per migliorare la situazione ci sono volute successive generazioni di satelliti meteo e nuovi strumenti di misura molto più articolati e sofisticati (radiometri).

Un altro campo in cui si lavora per migliorare i risultati dei modelli è il cosiddetto *post-processing*, ovvero il trattamento (solitamente su base statistica) delle uscite dirette dei modelli meteorologici. I metodi di *post-processing* utilizzati nell'ambito del servizio erogato da Arpa sono:

- Filtro di Kalman;
- *Multimodel Ensemble e SuperEnsemble*.

Essi si applicano attualmente ai parametri meteorologici superficiali che presentano variabilità a scale spaziali e temporali inferiori a quelle risolte dai modelli a circolazione generale o ad area limitata. Pertanto i processi fisici che descrivono la loro evoluzione non possono essere calcolati esplicitamente dal modello, ma devono essere para-

Umidita' del suolo 0-5 cm del 20MAR2005 23:00 LST

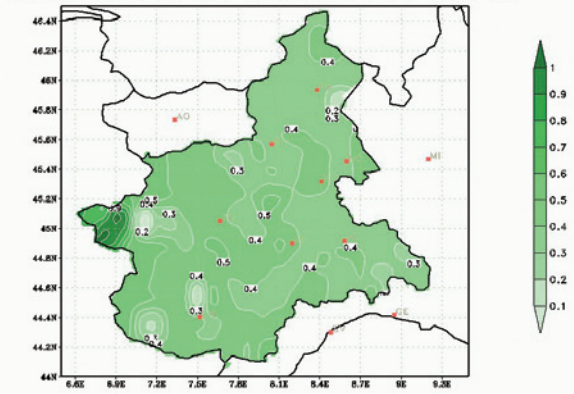


Figura 3.1.12 Esempio di umidità del suolo calcolata con il modello LSPM

Temp. del suolo 0-5 cm [°C] del 20MAR2005 23:00 LST

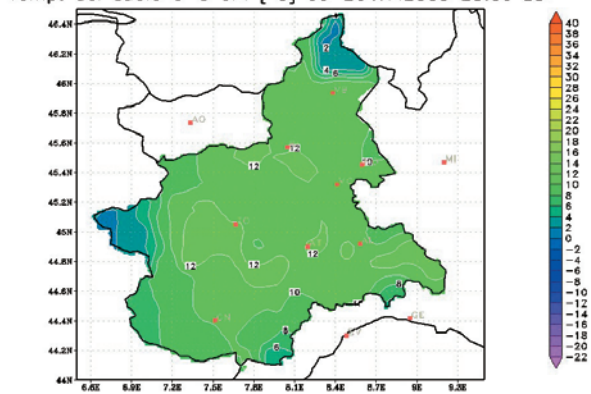


Figura 3.1.13 Esempio di temperatura del suolo calcolata con il modello LSPM

metrizzati *off-line* tramite opportuni schemi. Infatti, l'utilizzo diretto dell'*output* proveniente da un modello non fornisce ancora previsioni soddisfacenti; inoltre tali tecniche, mirando ad avvicinare la *traiettoria* del modello a quella delle osservazioni, valorizzano l'utilizzo di queste ultime. Per tenere conto dell'estrema variabilità atmosferica si potrebbero utilizzare predittori e predittandi solo delle ultime 2-3 settimane e valutare ogni giorno il loro legame statistico. In questo contesto, i metodi ricorsivi sono i migliori.

Figura 3.1.14 Diagramma di flusso dell'algoritmo di Kalman

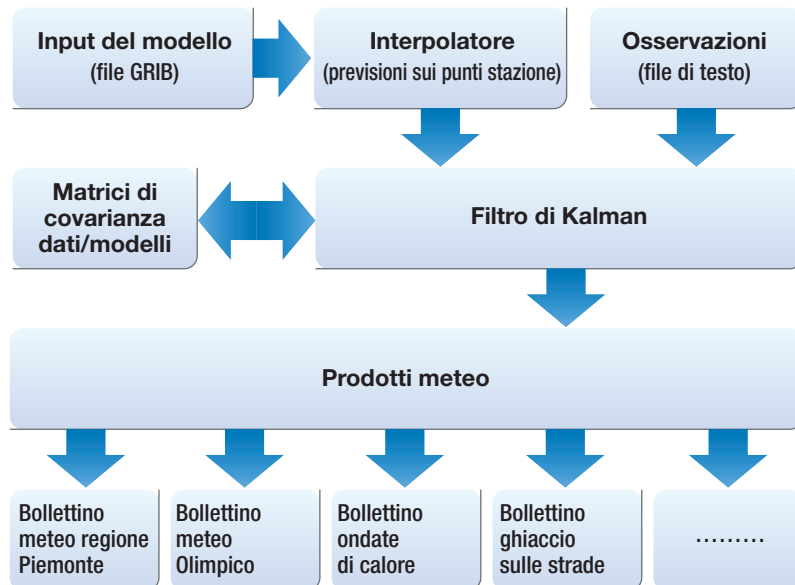


Figura 3.1.15

Errore medio della previsione di temperatura rispetto alle osservazioni di quattro stazioni della rete regionale a diverse quote (una in pianura, una in media montagna e due in alta montagna). A sinistra: output diretto dei modelli; a destra: output del filtro di Kalman.
 ecm12 t2m: temperatura a 2 m del ECMWF IFS;
 ecm12 int.t: temperatura interpolata del ECMWF IFS,
 lkd00 t2m: temperatura a 2 m del LM-DWD;
 lkd00 int.t: temperatura interpolata del LM-DWD;
 alm00 int.t: temperatura interpolata di aLMO

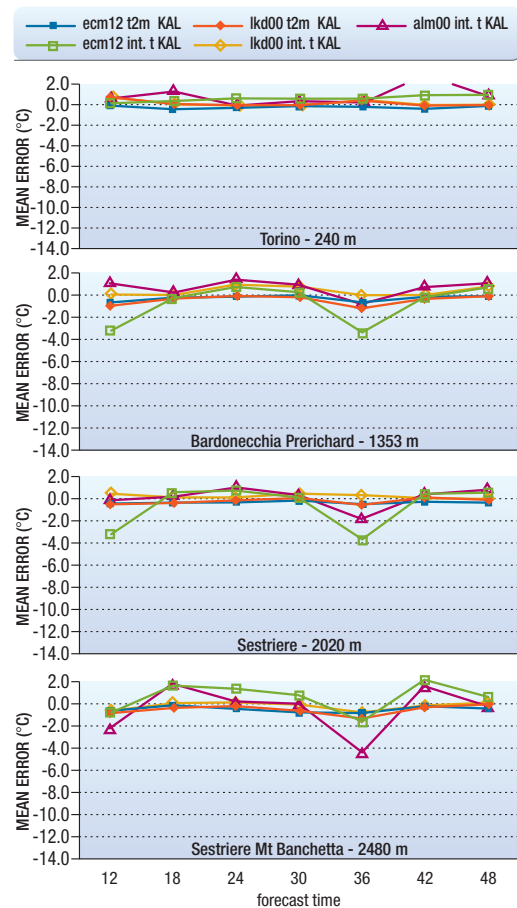
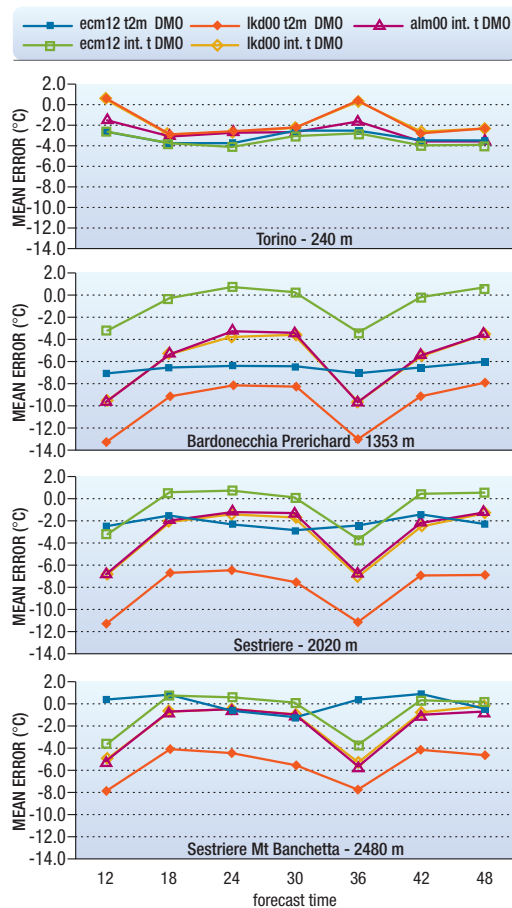
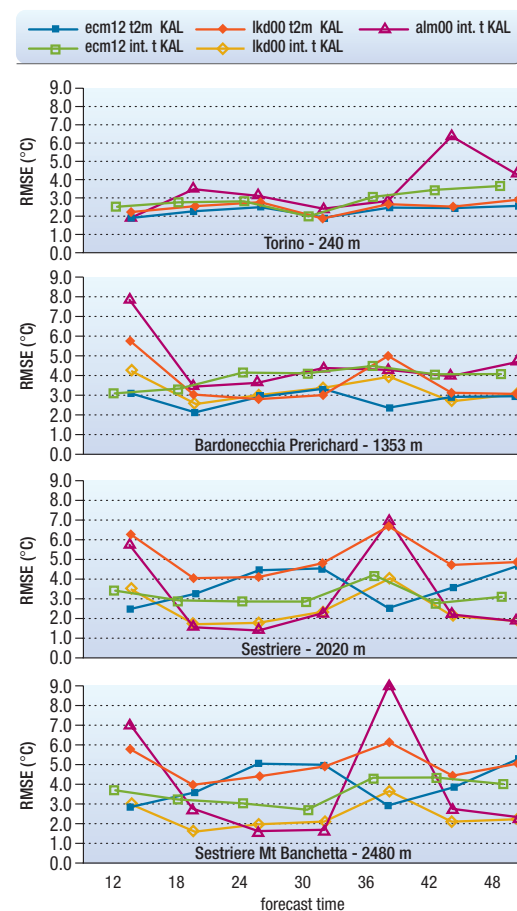
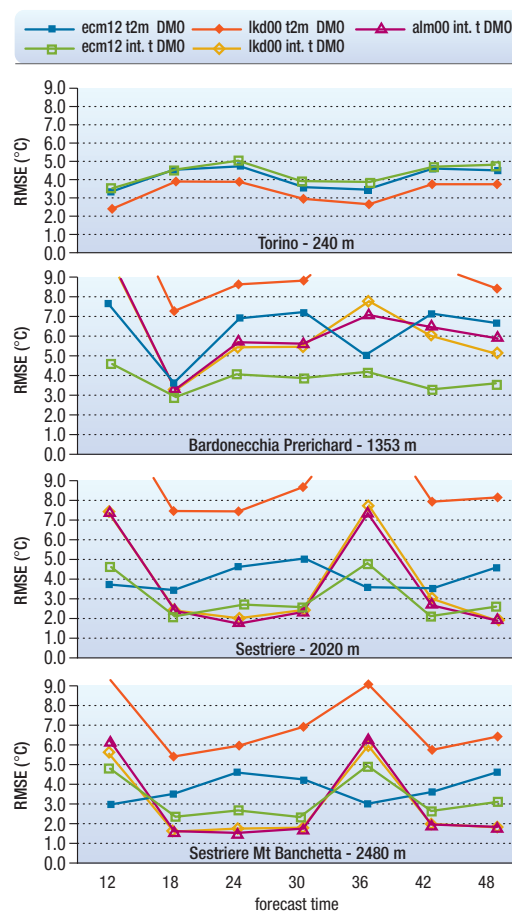


Figura 3.1.16

Errore quadratico medio della previsione di temperatura rispetto alle osservazioni di quattro stazioni della rete regionale a diverse quote (una in pianura, una in media montagna e due in alta montagna). A sinistra: output diretto dei modelli; a destra: output del filtro di Kalman.
 ecm12 t2m: temperatura a 2 m del ECMWF IFS;
 ecm12 int.t: temperatura interpolata del ECMWF IFS,
 lkd00 t2m: temperatura a 2 m del LM-DWD;
 lkd00 int.t: temperatura interpolata del LM-DWD;
 alm00 int.t: temperatura interpolata di aLMO



Attribuendo ai dati recenti un peso maggiore si ha un maggiore impatto sulle stime dei coefficienti, che riflette più fedelmente le condizioni presenti. La tecnica del filtro di Kalman (Kalman, 1960; Kalman & Bucy, 1961) permette di costruire uno schema ricorsivo ottimale.

Nel dettaglio, l'algoritmo del filtro di Kalman è il seguente:

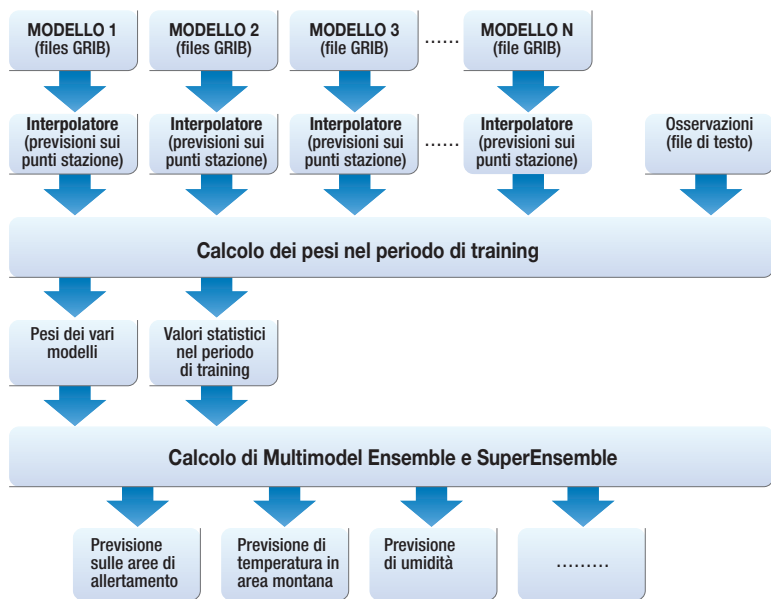
- calcolo della matrice di guadagno del filtro;
- calcolo dell'innovazione;
- calcolo del guadagno del filtro;
- aggiornamento dei parametri del filtro;
- aggiornamento della matrice di covarianza;
- aggiornamento della matrice di guadagno del filtro;
- calcolo della previsione corretta.

Attualmente presso il servizio meteorologico regionale sono operative più corse del filtro di Kalman su diversi modelli (ECMWF IFS, LAMI, nelle corse delle ore 00 UTC e 12 UTC) e diverse variabili meteorologiche (temperatura dell'aria, umidità, temperatura di rugiada, temperatura di bulbo bagnato, *heat index*, *humidex*, *discomfort index*).

La previsione di temperatura del filtro di Kalman nelle stazioni in quota non è sufficientemente accurata, per cui si è lavorato in due direzioni per migliorarne le prestazioni:

- modifiche ai parametri interni del filtro (x e p), per dare maggiore libertà alla risposta del filtro alle variazioni dell'*input*; non si sono riscontrati buoni risultati perché buone e cattive previsioni si alternano molto spesso nelle performance dei modelli e quindi il filtro presenta una risposta a queste variazioni che induce risonanza e quindi il successivo peggioramento delle previsioni;
- miglioramento dell'*input* (*Direct Model Output*): invece di usare la temperatura a 2 m calcolata dal modello, si utilizzano le previsioni di temperatura sui livelli di pressione superiore e inferiore rispetto alla quota della stazione e si interpolano alla quota della stazione utilizzando il geopotenziale. Così facendo stata ottenuta una riduzione dell'errore del DMO e, soprattutto, una riduzione nella variabilità giornaliera delle previsioni che permette un migliore funzionamento del filtro di Kalman. Le **figure 3.1.15** e **3.1.16** mostrano rispettivamente la riduzione dell'errore medio e dell'errore quadratico medio ottenuti con l'interpolazione delle temperature per quattro stazioni della rete piemontese.

Un secondo metodo di *post-processing* utilizzato presso Arpa Piemonte è l'approccio *Multimodel*, che, come dice il nome, consiste nell'utilizzo simultaneo di più modelli per la stima di parametri meteorologici. Tale metodo è stato proposto da Krishnamurti *et al.* (1999) con l'utilizzo di un *Ensemble* di modelli opportunamente mediati. Krishnamurti *et al.* (2000) propongono inoltre il *Multimodel SuperEnsemble*, che utilizza pesi diversi per ciascun modello considerato. Tali pesi vengono calcolati per ogni modello, in ogni pun-



to e ad ogni istante temporale sulla base di un certo periodo pregresso (cosiddetto di apprendimento). Successivamente si ipotizza che l'errore sistematico medio ed il peso di ciascun modello si mantengano costanti anche per il periodo di previsione seguente.

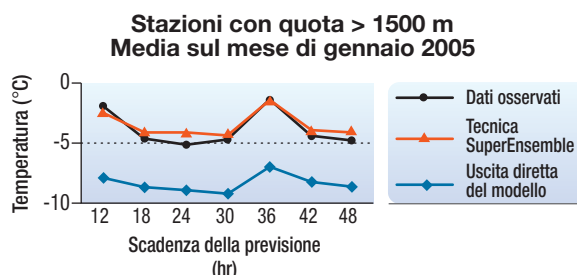
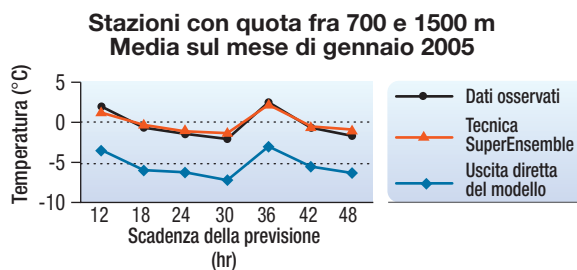
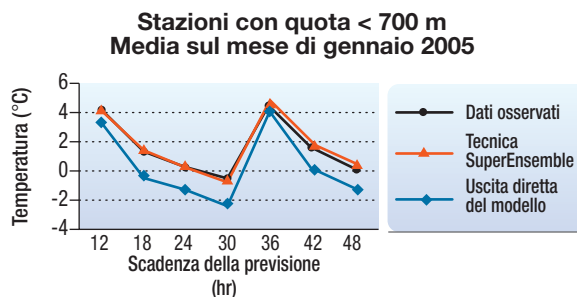


Figura 3.1.17
Diagramma di flusso dell'algoritmo di SuperEnsemble

Figura 3.1.18
Confronto tra i dati previsti dall'output diretto del modello (in azzurro) e dal Multimodel SuperEnsemble (in rosso) con i dati osservati dalla rete di Arpa Piemonte. Temperatura per le stazioni di pianura (quota < 700 m)

Figura 3.1.19
Confronto tra i dati previsti dall'output diretto del modello (in azzurro) e dal Multimodel SuperEnsemble (in rosso) con i dati osservati dalla rete di Arpa Piemonte. Temperatura per le stazioni di media montagna (700 m < quota < 1'500 m)

Figura 3.1.20
Confronto tra i dati previsti dall'output diretto del modello (in azzurro) e dal Multimodel SuperEnsemble (in rosso) con i dati osservati dalla rete di Arpa Piemonte. Temperatura per le stazioni di alta montagna (quota > 1'500 m)

temporalesco può comprendere anche forti raffiche di vento, soprattutto in corrispondenza delle celle più attive, con conseguente disagio per le attività umane e, in particolare, danni alla vegetazione, ai pali della luce ed ai tetti degli edifici.

Inoltre è possibile che ai fenomeni temporaleschi più intensi siano associati eventi di grandine che possono produrre danni alle coltivazioni, alla viabilità stradale nonché alle persone. In considerazione del grande impatto che hanno sul territorio, sono stati effettuati studi specifici per la caratterizzazione qualitativa e quantitativa dei fenomeni temporaleschi, con l'obiettivo di creare uno strumento operativo utile per l'allertamento in caso di eventi convettivi significativi, in grado di predire in termini probabilistici o deterministici (con un limitato ma noto margine di errore) l'approssimarsi di un evento temporalesco. In particolare, è già stato effettuato uno studio degli indici termodinamici più noti operativamente (K, CAPE, Lift, SWEAT) come predittori di eventi temporaleschi a partire da campi di analisi ECMWF e da dati osservati sia di fulminazioni, sia di precipitazioni.

Tale analisi è stata eseguita su più casi studio e su più periodi di tempo, in modo da verificare e validare la bontà dei rispettivi indici e soprattutto individuare valori soglia che siano rappresentativi localmente. Attualmente è in corso la verifica della capacità del modello locale LAMI nel predire gli eventi temporaleschi, mediante gli indici più significativi ottenuti con l'analisi precedentemente descritta.

Pioggia

Vengono presi in considerazione eventi di precipitazione intensa media suddivisa in classi. La precipitazione viene calcolata per ciascuna delle aree di allertamento come valore medio di precipitazioni previsto sull'intervallo di 12 o di 24 ore. Vengono individuati i quantitativi di precipitazione riconosciuti come superiori a soglie di riferimento. Le soglie sono differenziate per ogni zona di allerta e sono rappresentate da una frazione della soglia per moderata criticità.

Il superamento di tali soglie può portare al superamento dei livelli idrometrici critici lungo i corsi d'acqua principali, con conseguente sviluppo di fenomeni alluvionali, di trasporto di massa lungo i corsi d'acqua a regime torrentizio e franosi sui settori montuosi e collinari. Per la previsione di tale grandezza il campo più importante è chiaramente il valore di precipitazione prevista dai modelli. In particolare il modello a circolazione globale fornisce una migliore indicazione dei valori medi ed è più affidabile per previsioni a lungo termine, mentre le quantità più intense di precipitazione sono previste meglio dai modelli ad area limitata, anche se i valori massimi previsti risultano spesso molto diversi da quelli osservati,



Precipitation (mm/24hr) at 15SEP2004 00:00 UTC

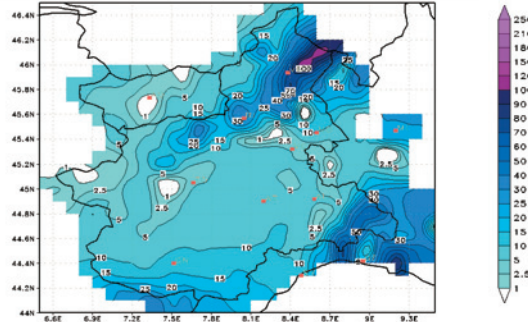
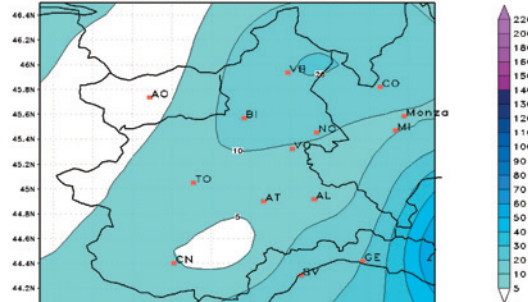


Figura 3.1.22 Esempio di Bollettino di Vigilanza Meteorologica

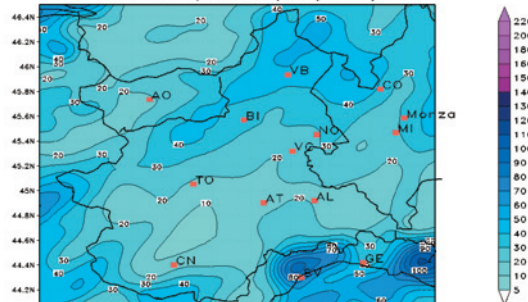
Total Precipitation (mm/24hr)



ECMWF00 - Wed 15 SEP 2004 00:00 UTC 48 HR FC - AN: 2004091300

Figura 3.1.23 Campo di precipitazione osservato

Total Precipitation (mm/24hr)



LAMINUDGE - Wed 15 SEP 2004 00:00 UTC 48 HR FC - AN: 2004091300

Figura 3.1.24 Campo di precipitazione previsto dal modello globale di ECMWF (UK)

Figura 3.1.25 Campo di precipitazione previsto dal modello LAMI (IT)

sia come localizzazione spazio-temporale sia come quantità, come si evince dall'esempio riportato nelle **figure 3.1.23 e 3.1.25**, durante l'evento convettivo del 15 settembre 2004.

Per questi motivi, è indispensabile da parte del previsore non utilizzare direttamente il campo previsto dai modelli, ma elaborare (e filtrare) l'informazione sulla base di una serie di considerazioni preliminari quali:

- confronto fra le configurazioni sinottiche previste dai diversi modelli con attenzione al flusso sulla regione a tutti i livelli (coerenza);
- valutazione dello scostamento fra le prime scadenze previste (+12/+6 h) e le misure (immagini satellitari e dati osservati a scala sinottica);
- confronto delle configurazioni previste dallo stesso modello con orari di inizializzazione diversa e con le previsioni del giorno precedente (consistenza interna);
- valutazione delle caratteristiche stagionali;
- valutazione della performance dei modelli nei giorni precedenti (validazione);
- confronto con situazioni precedenti di riferimento (in casi dubbi e/o critici).

L'analisi della situazione meteorologica e della sua probabile evoluzione viene quindi definita con maggiore dettaglio. Si prende in considerazione specificatamente l'area regionale e ci si concentra su ciascuna delle singole scadenze su cui si estende la previsione (attualmente si giunge al secondo giorno successivo a quello di emissione) focalizzando l'attenzione su alcuni aspetti specifici:

- presenza di instabilità (convettiva e frontale);
- interazione del flusso con l'orografia (induzione, modificazione, intensificazione, controllo della precipitazione);
- localizzazione minimi di pressione (suolo/quota).

Solamente alla fine di questo processo evolutivo, il meteorologo è in grado di produrre una ragionevole previsione quantitativa di precipitazione sulla regione.

Un ulteriore dato importante associato all'intensità della precipitazione è la previsione della quota al di sopra della quale la precipitazione ha carattere nevoso. La previsione di tale quota si basa in primo luogo sulla previsione del livello dello zero termico nell'atmosfera: sapendo che il fiocco di neve in caduta può rimanere allo stato solido fino a circa 2-3 °C, il livello della quota neve è determinato di conseguenza e normalmente situato a circa 400-500 m al di sotto del livello dello zero termico. Tuttavia la stratificazione termica dell'atmosfera può essere molto differente dal profilo termico standard che è pari a circa 6 °C/1'000 m. Nel corso dell'attività svolta in questi anni si è riscontrato che in condizioni di un profilo di temperatura quasi isoterma oppure con una debole diminuzione di temperatura con la quota o ancora in presenza di inversioni termiche, la differen-

za di livello tra lo zero termico e la quota neve può arrivare fino a 1'500 m. Viceversa se l'atmosfera si presenta in una stratificazione fortemente instabile, con una marcata diminuzione di temperatura con la quota, la quota neve può essere di soli 100-200 m al di sotto dello zero termico. Per la previsione della stratificazione termica vengono utilizzati i radiosondaggi termodinamici previsti su tutti i livelli dal modello meteorologico ad area limitata LAMI sui siti di Torino, Cuneo, Alesandria, Novara, Verbania, Susa, Cesana, Domo-dossola ed Aosta. Un'altra utile indicazione è fornita dall'esame degli ultimi radiosondaggi osservati sui siti di Milano Linate e Cuneo Levaldigi e dal loro confronto con i radiosondaggi previsti dall'ultima corsa del modello e più prossimi all'istante osservato.

Per le varie località ed in particolare per quelle pianeggianti, occorre ricordare che i valori della temperatura a 2 m, anch'essi fondamentali per discriminare il tipo di precipitazione prevista sulla località, sono soggetti a variazioni nel corso della giornata determinate da effetti radiativi. Pertanto per ottenere una previsione della temperatura il più possibile corretta sulle singole località, occorre applicare alle uscite dirette della variabile temperatura, elaborate dai modelli meteorologici, degli opportuni filtri statistici che ne correggano l'errore sistematico e minimizzino l'errore casuale.

Nevicata

Si prende in esame l'intensità della nevicata prevista per classi. Le soglie di riferimento variano in base alla quota (al di sotto o al di sopra di 700 m) e in base all'intervallo temporale considerato (12 o 24 ore). Il superamento delle soglie prefissate comporta gravi difficoltà di svolgimento di fondamentali attività umane quali ad esempio i trasporti, sia pubblici che privati.

In particolare, possono insorgere problemi di mobilità causata dai rallentamenti della circolazione e dallo svolgimento delle operazioni di sgombero neve, interruzione di fornitura di servizi (energia elettrica, telefonia fissa, ecc.) per danni alle linee aeree di distribuzione dovuti al sovraccarico della neve, isolamento temporaneo di borgate e case sparse. Inoltre, in seguito al perdurare di nevicata abbondanti, si possono verificare cedimenti delle coperture di edifici e capannoni.

Gelate in pianura

Si intende segnalare le gelate precoci o tardive (prima di dicembre e dopo febbraio) con riferimento in particolare alle ricadute nell'ambito dell'agricoltura (con possibili danni alle coltivazioni) e della circolazione stradale (con difficoltà di transito su tutte le arterie di comunicazione, principali e secondarie). A questo riguardo l'Area Previsione e Monitoraggio Ambientale di Arpa si è occupata dell'implementazione e della messa a punto di un

modello attraverso il quale si ottiene un prodotto previsionale numerico a 24 h della temperatura e dello stato della superficie stradale, a partire dai valori osservati di temperatura dell'aria, punto di rugiada, umidità relativa, nuvolosità, velocità del vento e precipitazioni.

Vento

Si intende segnalare situazioni rilevanti in montagna che possono portare disagi alle attività umane in alta quota e situazioni rilevanti sulle pianure, in particolare in caso di *foehn* con possibili danni locali alla vegetazione e agli edifici. Vengono definite le soglie di riferimento in base alla quota (1'500 m o 3'000 m). La criticità è legata a possibili danni alle strutture provvisorie, a disagi alla viabilità, a possibili crolli di padiglioni, a disagi allo svolgimento di attività umane soprattutto in alta quota, a problemi per la sicurezza dei voli. La maggiore criticità riguarda la previsione del vento di caduta (*foehn*) in quanto fortemente dipendente dalla complessa orografia della regione. Sono in corso studi per determinare empiricamente un indice di *foehn* che tenga conto dei parametri previsti di velocità del vento, pressione al suolo, umidità e temperatura.

Per la sua previsione un ottimo supporto è costituito dall'*output* diretto del vento alle varie quote fornito dai modelli, in particolare da quelli ad area limitata che hanno una rappresentazione dell'orografia con una maggiore risoluzione e quindi più fedele alla realtà. Un'altra indicazione è fornita dall'esame della presenza di forti gradienti barici (maggiori di 4 hPa, responsabili del vento intenso) e termici (4.5 °C a 925 e 850 hPa e 6 °C a 700 hPa, che comportano un'atmosfera stabile sottovento) tra Pianura Padana ed Alpi.

Nebbia

Si intende segnalare la scarsa visibilità con particolare riferimento ai problemi della viabilità stradale (sia principale che secondaria) e della sicurezza per il volo (aeroporti). Attualmente, tale parametro viene stimato principalmente sulla base dei dati osservati di visibilità ed umidità al suolo.

Dal punto di vista previsionale è importante tenere in considerazione che le situazioni di nebbia si verificano normalmente in condizioni anticicloniche con presenza o afflusso di umidità nei bassi strati. L'esame della situazione, unita alla visione dei radiosondaggi previsti per determinare lo sviluppo di inversioni termiche, fornisce utili indicazioni. Nel caso di nebbia persistente le immagini del satellite geostazionario METEOSAT nella banda del visibile e l'analisi dei radiosondaggi osservati sono di grande supporto nell'identificazione del fenomeno e nella previsione della sua evoluzione a breve termine. La previsione delle nebbie post-frontali risulta essere più difficile rispetto a quella delle nebbie di radiazione in quanto occorre una

previsione precisa della tempistica del rasserenamento e dell'eventuale arrivo di vento in pianura; ritardi o anticipi dell'ordine di poche ore possono determinare situazioni radicalmente diverse dal punto di vista della visibilità. Anche in questo caso un valido aiuto è costituito dall'esame dettagliato dell'atmosfera nei bassi strati attraverso i radiosondaggi previsti.

È in studio una prima definizione di un indice statistico per la previsione delle nebbie basata sulla correlazione tra umidità relativa, velocità del vento, temperatura, presenza di un'inversione termica nei bassi strati previsti dal modello LAMI ed i corrispondenti valori di visibilità. Sono stati inoltre avviati i primi contatti con l'Università di Bonn per lo sviluppo di un nuovo modello di microfisica delle nubi da inserire nel modello meteorologico operativo, anche se la previsione modellistica diretta di tale variabile risulta molto dispendiosa dal punto di vista del tempo di calcolo e quindi non utilizzabile operativamente.

Ondate di calore in pianura

Vengono riportate in questo ambito le valutazioni effettuate nei *Bollettini di Previsione delle Ondate di Calore* per i capoluoghi di provincia. Tale variabile prende in considerazione il disagio avvertito dalla popolazione in conseguenza di prolungate condizioni di caldo con elevati valori di umidità e assenza di ventilazione.

Le condizioni meteorologiche di caldo estremo ed il loro impatto sulla salute costituiscono infatti un problema molto attuale in Italia, specie dopo gli eventi dell'estate del 2003, quando l'Italia settentrionale è stata interessata da lunghi periodi caratterizzati da temperature ed umidità elevate, con valori al di sopra delle medie stagionali, sia durante le ore diurne, sia durante le ore notturne. Studi epidemiologici indicano che queste condizioni provocano disagio fisiologico alla popolazione: i soggetti più a rischio sono le persone affette da malattie cardio-respiratorie e le persone anziane che sono dotate di una ridotta capacità di termoregolazione.

La possibilità di prevedere variazioni meteorologiche a breve periodo con il loro potenziale impatto sulla salute umana, consente la pianificazione e la gestione di interventi di prevenzione e riduzione del danno. Al fine di dotare la città di Torino e la regione Piemonte di un sistema di allertamento peculiare, per la prevenzione degli effetti delle ondate di calore sulla salute, l'Area Previsione e Monitoraggio Ambientale in collaborazione con il Servizio di Epidemiologia Ambientale ha attivato un progetto di analisi e studio di dati storici climatologici ed epidemiologici finalizzato alla realizzazione di un modello previsionale delle criticità dovute a condizioni meteorologiche avverse per la presenza di ondate di calo-

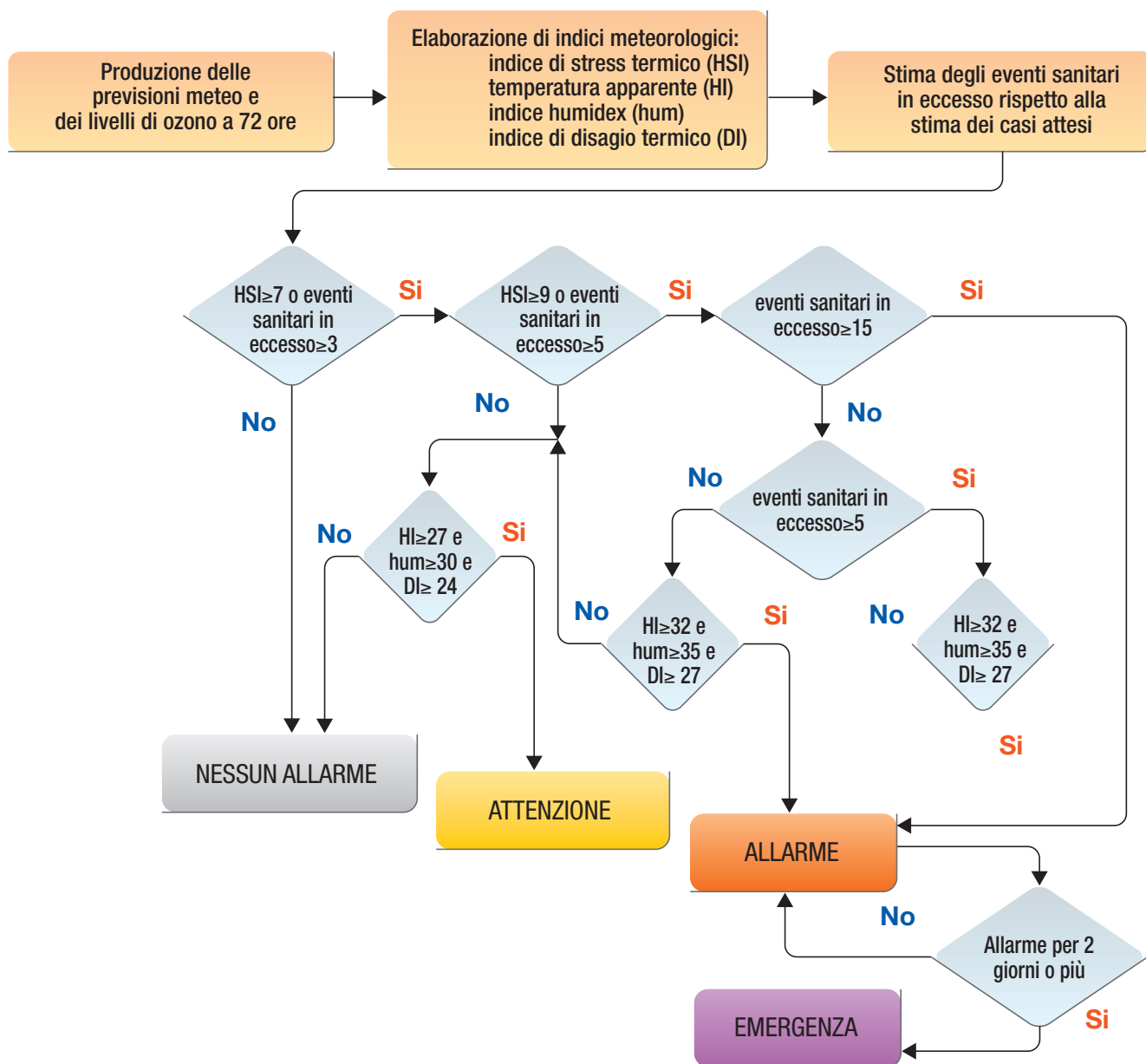


Figura 3.1.26
 Albero decisionale
 dei livelli di rischio

re ed in particolare per l'area urbana di Torino rivolto a stimare l'impatto delle ondate di calore sulla mortalità.

I parametri meteorologici utilizzati dal modello sono: temperatura massima, temperatura apparente massima e minima (Steadman, 1984), numero di giorni consecutivi con temperatura apparente elevata, livello di ozono ed altri parametri meteorologici necessari al calcolo di alcuni indici di benessere. Le soglie biometeorologiche di tali indici sono scelte in funzione delle condizioni climatiche locali e da criteri di specificità e di sensibilità che non derivano direttamente da valori di letteratura. La percezione del disagio dovuta alle condizioni meteorologiche è peculiare alla regione ed all'area locale ed è per queste ragioni che si è deciso di utilizzare un indice relativo, *Heat Stress Index* (Kalkstein, 2003). L'*Heat Stress Index* è un indice biometeorologico che valuta la risposta fisiologica della popolazione alle variabili meteorologiche, basandosi sia sulla localizzazione che sul

periodo stagionale attraverso l'analisi della distribuzione di probabilità delle variabili meteorologiche misurate nel passato.

Da questo sviluppo deriva un servizio in grado di fornire informazioni previsionali di diverso tipo:

- *meteorologiche*: tipo di caldo (in base alla temperatura prevista ed all'umidità relativa attesa), temperatura massima, umidità media giornaliera, temperatura percepita (massima e minima), livello di ozono massimo giornaliero ed indice sintetico di stress da calore;
- *sanitarie*: numero di eventi sanitari in eccesso;
- *livelli di rischio*: nessun allarme, attenzione, allarme o emergenza.

Per fornire una previsione dei parametri temperatura, umidità e vento più accurata sono utilizzati schemi di post-elaborazione, attraverso correlazioni statistiche tra le grandezze previste dal modello ad area limitata LAMI ed i parametri meteorologici al suolo e per tenere in conto l'estrema variabilità atmosferica si













<p style="text-align: center;">NESSUN ALLARME</p> <hr/> <p style="text-align: center;">0</p>	<p>0) Condizioni meteorologiche non critiche e nessun eccesso di eventi sanitari previsto rispetto agli attesi</p>	<p style="text-align: center;">ALLARME</p> <hr/> <p style="text-align: center;">2 </p>	<p>5) Condizioni meteorologiche associate a $HSI \geq 9$ e a indici bioclimatici sintetici nella classe "estrema cautela"</p>
<p style="text-align: center;">ATTENZIONE</p> <hr/> <p style="text-align: center;">1 </p>	<p>1a) $15\% < EM \leq 30\%$ degli attesi, condizioni meteo associate a $HSI < 7$ e indici bioclimatici sintetici nella classe "cautela"</p> <p>1b) $30\% < EM \leq 100\%$ degli attesi, condizioni meteo associate a $HSI < 7$ e a indici bioclimatici sintetici che non rientrano nella classe "estrema cautela"</p> <p>1c) $30\% < EM \leq 100\%$ degli attesi, condizioni meteo associate a $HSI \geq 7$ e a indici bioclimatici sintetici che rientrano nella classe "benessere"</p>	<p style="text-align: center;">ALLARME</p> <hr/> <p style="text-align: center;">2  </p>	<p>6a) $15\% < EM \leq 100\%$ degli attesi, condizioni meteo associate a $HSI \geq 7$ e a indici bioclimatici sintetici che rientrano nella classe "estrema cautela"</p> <p>6b) $EM > 100\%$ degli attesi, condizioni meteo associate a $HSI \geq 7$ e a indici bioclimatici sintetici che rientrano nella classe "cautela"</p>
<p style="text-align: center;">ATTENZIONE</p> <hr/> <p style="text-align: center;">1 </p>	<p>2) Condizioni meteorologiche associate a $HSI \geq 7$ e a indici bioclimatici sintetici nella classe "cautela"</p>	<p style="text-align: center;">EMERGENZA</p> <hr/> <p style="text-align: center;">3 </p>	<p>7) Livello di rischio "Allarme" per eccesso di eventi sanitari con persistenza del livello di allarme per due o più giorni consecutivi</p>
<p style="text-align: center;">ATTENZIONE</p> <hr/> <p style="text-align: center;">1  </p>	<p>3) $15\% < EM \leq 100\%$ degli attesi, condizioni meteo associate a $HSI \geq 7$ e a indici bioclimatici sintetici che rientrano nella classe "cautela"</p>	<p style="text-align: center;">EMERGENZA</p> <hr/> <p style="text-align: center;">3 </p>	<p>8) Livello di rischio "Allarme" per condizioni meteorologiche critiche con persistenza del livello di allarme per due o più giorni consecutivi</p>
<p style="text-align: center;">ALLARME</p> <hr/> <p style="text-align: center;">2 </p>	<p>4a) $EM > 100\%$ degli attesi, condizioni meteo associate a $HSI < 7$</p> <p>4b) $EM > 100\%$ degli attesi, condizioni meteo associate a $HSI \geq 7$ e a indici bioclimatici sintetici che rientrano nella classe "benessere"</p> <p>4c) $30\% < EM \leq 100\%$ degli attesi, condizioni meteo associate a $HSI < 7$ e a indici bioclimatici sintetici che rientrano nella classe "estrema cautela"</p>	<p style="text-align: center;">EMERGENZA</p> <hr/> <p style="text-align: center;">3  </p>	<p>9) Livello di rischio "Allarme" per eccesso di eventi sanitari e condizioni meteorologiche critiche con persistenza del livello di allarme per due o più giorni consecutivi</p>

Figura 3.1.27
Legenda dei livelli di rischio

sono utilizzati predittori e predittandi delle ultime 2-3 settimane precedenti la previsione.

Con i valori previsti viene calcolata la temperatura apparente o percepita di Steadman (1984): un indice che permette di stimare il disagio fisiologico dovuto all'esposizione a condizioni meteorologiche caratterizzate da alte temperature ed elevati livelli igroscopici dell'aria, nonché da ridotta velocità del vento al suolo.

Il modello previsionale delle ondate di calore utilizza come variabili di *input* i valori massimi e minimi giornalieri di temperatura percepita. Da studi epidemiologici è stato infatti verificato che temperatura ed umidità elevate durante le ore notturne non permettono al corpo umano il recupero fisiologico del disagio accumulato nelle ore diurne. I giorni consecutivi di caldo estremo vengono osservati quando la temperatura percepita massima supera di una deviazione standard il valore medio climatologico del periodo 1990-2003 senza soluzione di continuità. Un altro dato di ingresso al modello è la massima concentrazione giornaliera di ozono prevista attraverso un modello statistico a rete neurale.

Come indice sintetico di stress da caldo si utilizza l'*Heat Stress Index* (HSI), indice biometeorologico relativo, che viene calcolato seguendo la procedura indicata da Kalkstein (2003) ed utilizzando i dati di una stazione di misura posta nel centro urbano della città di Torino.

Le variabili derivate da questi dati e funzionali all'elaborazione dell'HSI sono: la temperatura apparente, i gradi di raffreddamento giornaliero, il numero di giorni consecutivi di caldo estremo e la copertura nuvolosa.

Dall'analisi dei dati climatologici misurati negli ultimi 14 anni e relativi alla decade centrata sul giorno in esame, viene determinata la distribuzione statistica di ogni variabile e la corrispondente curva di probabilità cumulativa. Per ogni valore assunto dalla variabile in esame viene quindi calcolato il corrispondente percentile. Il valore percentile di ogni variabile viene quindi sommato dando origine alla grandezza SUM.

L'HSI non è altro che il valore percentile associato alla posizione del valore giornaliero di SUM sulla relativa curva di probabilità cumulativa. Per la sua previsione, oltre ai dati meteorologici precedentemente descritti, si utilizzano i valori di copertura nuvolosa previsti attraverso il LAMI, verificati soggettivamente.

Il modello epidemiologico associato è un modello multivariato che stima il numero di eventi sanitari in eccesso (gli eventi sanitari sono intesi come numero di decessi giornalieri di persone con età superiore ai 64 anni, l'eccesso è definito come differenza tra il numero di eventi atteso e il numero stimato dal modello teorico, gli even-

ti attesi giornalieri – in media 15 – sono calcolati sulla base della serie storica maggio-settembre 1990-2002, con metodi di regressione non parametrica lungo l'asse degli anni su un intorno di 5 giorni e, successivamente, lungo periodi estivi di 153 giorni).

Metodi di regressione multivariata hanno portato alla selezione dei casi osservati in rapporto agli attesi: HSI del giorno, temperatura apparente massima registrata o prevista dei due giorni precedenti, giorni consecutivi di caldo estremo, livello massimo di ozono del giorno e del giorno precedente. Il modello multivariato ha poi suggerito i parametri da inserire nell'algoritmo di stima del numero di casi in eccesso, intorno ai quali sono state definite quattro classi possibili: nessuno, basso, medio o alto. È importante osservare come il modello tenga conto anche di variabili di *input* relative ai giorni precedenti la data di previsione: è stato infatti osservato frequentemente un intervallo di tempo tra le condizioni meteorologiche severe ed i conseguenti eccessi di mortalità. Un albero decisionale complesso sintetizza il livello di rischio atteso (0-1-2-3) unendo le informazioni meteorologiche e sanitarie previsionali, che può derivare da condizioni meteorologiche critiche, da un eccesso di eventi sanitari o da entrambi.

L'obiettivo di tale bollettino è quello di fornire al servizio sanitario locale le informazioni necessarie per l'organizzazione degli interventi medici e di prevenzione nel caso di ondate di calore previste.

Bibliografia

I lavori contrassegnati da asterisco non sono citati esplicitamente nel testo.

*Bluestein H.B. (1992), *Synoptic-Dynamic Meteorology in Midlatitudes*. Oxford University Press, Oxford.

Cane D. & Milelli M. (2005a), *A new method for T2m forecast in complex orography areas*. COSMO Newsletter, submitted.

Cane D. & Milelli M., (2005b), *Use of Multimodel SuperEnsemble Technique for Mountain-area weather forecast in the Olympic Area of Torino 2006*. Croatian Meteorological Journal 40.

Ebert E.E. & McBride J.L. (2000), *Verification of precipitation in weather systems: Determination of systematic errors*. J. Hydrology, vol. 239, pp. 179-202.

Ebert E.E. & McBride J.L. (1997), *Methods for verifying quantitative precipitation forecasts: Application to the BMRC LAPS model 24-hour precipitation forecasts*. BMRC Techniques Development Report n. 2, pp. 87.

Hamill T.M. (1999), *Hypothesis tests for evaluating numerical precipitation forecasts*. Wea. Forecasting, vol. 14, pp. 155-167.

Kalkstein L.S. & Watts J. (2003), *The Development of a Warm Weather Relative Stress Index for Environmental Applications*. University of Delaware, Newark.

Kalman R.E. (1960), *A new approach to linear filtering and prediction problems*. Trans. ASME. J. BasicEngrg, Series D, vol. 82, pp. 35-45.

Kalman R.E. & Bucy R.S. (1961), *New results in linear filtering and prediction problems*. Trans. ASME. J. BasicEngrg, Series D, vol. 83, pp. 95-108.

*Trenberth K. (1993) (ed.), *Climate System Modelling*. Cambridge University Press, pp. 818.

Krishnamurti T.N. et al. (1999), *Science*, vol. 285, pp. 1548-1550.

Krishnamurti T.N. et al. (2000), *J. Climate*, vol. 13, pp. 4196-4216.

Loglisci N., Cassardo C., Balsamo G.P. & Qian M.W. (2001), *A technical description of the Land Surface Process Model (LSPM version 2000)*. University of Turin DFG Report.

Lorenz E.N. (1963), *Deterministic non-periodic flow*. J. Atmos. Sci., vol. 20, pp. 130-141.

Milelli, M. & Mercogliano, P. (2005), to be published in *Natural Hazards and Earth System Sciences*.

Milelli M., Oberto E., Bertolotto P. & Pelosini R. (2003), *Verification of QPF over Piedmont and Northern Italy using high-resolution non-GTS data*. Proceedings of Ecam, 15-19 September, Rome.

Molteni F., Buizza R., Palmer T.N., & Petroliagis T. (1996), *The new ECMWF ensemble prediction system: methodology and validation*. Q.J.R. Meteorol. Soc., vol. 122, pp. 73-119.

Oberto E., Milelli M., Bertolotto P. & Pelosini R. (2003), *High Resolution QPF Verification of LM Using Non-GTS Data over Piedmont and Central-Northern Italy*. COSMO NEWSLETTER n. 3.

Orlansky I. (1975), *A rational subdivision of scales for atmospheric processes*. Bull. Amer. Meteor. Soc., vol. 56, pp. 527-530. NP; Unter- teilung in macro-, meso-, mikro-Skala.

Steadman R.G. (1984), *A universal expression of apparent temperature*. J. Appl. Meteor., vol. 23, pp. 1674-87.

Stanski H.R., Wilson L.J. & Burrows W.R. (1989), *Survey of common verification methods in meteorology*. World Weather Watch Tech. Rept. n. 8, WMO/TD n. 358, WMO, Geneva, pp. 114.

Turco M., Oberto E. & Bertolotto P. (2005), *Progresses on LAMI, LM-DWD, aLMo verification over Northern Italy*. Submitted to COSMO NEWSLETTER n. 5.

Wilks D.S. (1995), *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. An Introduction*. Academic Press, San Diego, pp. 467.

Wu J. (1982), *Wind-stress coefficients over sea surface from breeze to hurricane*. J. Geophys. Res. C87, pp. 9704-9706.