

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

---

Scuola di Scienze  
Corso di Laurea Magistrale in Fisica

**Analisi meteorologica e modellistica  
dei due eventi alluvionali in Liguria  
dell'autunno 2011:  
Cinque Terre - 25 ottobre  
Genova - 4 novembre**

**Relatore:  
Dott. Andrea Buzzi**

**Presentata da:  
Daniele Gallo**

**Sessione II  
Anno Accademico 2012/2013**

## Sommario

Nell'autunno del 2011 due eventi meteorologici estremi caratterizzati da intense precipitazioni hanno interessato la Liguria. Nella giornata del 25 ottobre si è verificato sul Levante ligure un evento alluvionale di rilevante entità, determinato dalla formazione di un intenso sistema convettivo che ha coinvolto l'area compresa tra il Tigullio, le Cinque Terre ed il bacino del Magra.

Un altro episodio di forte maltempo si è verificato tra il 3 e il 9 novembre 2011, e in particolare il forte sistema convettivo che ha interessato Genova la mattina del 4 novembre, in cui avvenne l'esondazione in alcuni punti del torrente Bisagno e del rio Fereggiano. Tuttavia, nel corso del lungo periodo perturbato si sono registrati vari episodi di esondazione, localizzati principalmente in zone golenali agricole, anche sui versanti padani della regione, oltre a numerosi casi di smottamenti e frane.

I casi sopra citati sono stati studiati facendo innanzitutto un'accurata analisi meteorologica a scala sinottica e alla mesoscala, esaminando in particolar modo i meccanismi che hanno portato l'innescò dei due sistemi temporaleschi.

In secondo luogo, utilizzando anche dati osservativi disponibili, si è voluto mettere in evidenza la reale e significativa evoluzione nel tempo e nello spazio dei dati pluviometrici delle stazioni al suolo, e dei parametri fisici più importanti, come ad esempio la direzione e l'intensità del vento.

Infine, utilizzando simulazioni numeriche dei modelli sviluppati all'ISAC-CNR di Bologna (BOLAM e MOLOCH), ci si è posti l'obiettivo di verificare la loro sensibilità alla risoluzione e ad altri aspetti numerici e fisici, in particolare per quanto riguarda i dati relativi alla precipitazione. I modelli, oltre a riprodurre la dinamica degli eventi in maniera fisicamente coerente anche se non del tutto accurata, sono stati utilizzati, previo confronto con le osservazioni, per verificare alcune ipotesi formulate relative ai processi fisici responsabili dell'intensità della precipitazione, come ad esempio la presenza del flusso (*outflow*) di aria fredda proveniente dalla cold pool in relazione con le correnti caldo-umide negli strati più bassi (*Low Level Jet, LLJ*), e la formazione di una zona di convergenza nella quale è più alta la probabilità che si sviluppino sistemi convettivi organizzati.

# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>I modelli</b>	<b>8</b>
2.1	Il modello BOLAM . . . . .	9
2.1.1	Dinamiche del modello . . . . .	9
2.1.2	Fisica del modello: ciclo atmosferico dell'acqua . . . . .	10
2.1.3	Parametrizzazione della turbolenza e del drag orografico . . . . .	10
2.1.4	Processi relativi alla superficie, al suolo e alla vegetazione . . . . .	11
2.1.5	Radiazione atmosferica . . . . .	11
2.2	Il modello MOLOCH . . . . .	12
2.2.1	Dinamiche del modello . . . . .	12
2.2.2	Fisica del modello: ciclo atmosferico dell'acqua . . . . .	13
2.2.3	Parametrizzazione della turbolenza e del drag orografico . . . . .	13
<b>3</b>	<b>Analisi meteorologica degli eventi alluvionali</b>	<b>14</b>
3.1	Cinque Terre - 25 ottobre 2011 . . . . .	15
3.1.1	Analisi a scala sinottica . . . . .	15
3.1.2	Analisi alla mesoscala . . . . .	21
3.2	Genova - 4 novembre 2011 . . . . .	28
3.2.1	Analisi a scala sinottica . . . . .	28
3.2.2	Analisi alla mesoscala . . . . .	33
<b>4</b>	<b>Analisi dei dati osservati al suolo</b>	<b>38</b>
4.1	Trattamento dei dati ARPAL . . . . .	38
4.2	Evento delle Cinque Terre . . . . .	39
4.3	Evento di Genova . . . . .	51
<b>5</b>	<b>Analisi modellistica dei due eventi alluvionali</b>	<b>66</b>
5.1	Evento delle Cinque Terre . . . . .	69
5.2	Evento di Genova . . . . .	83
<b>6</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>99</b>

## **Ringraziamenti**

Durante la realizzazione di questa tesi ho avuto il piacere di interagire con il gruppo di ricerca dell'ISAC-CNR di Bologna, il quale mi ha fornito un valido supporto per l'analisi dei dati e dei modelli utilizzati in questo elaborato.

Inoltre mi preme ringraziare la mia famiglia, senza la quale, attraverso importanti sacrifici economici, non avrei potuto raggiungere questi importanti traguardi, e la mia fidanzata Daniela che mi ha dato un sostegno morale davvero eccezionale e, senza cadere nella facile retorica, mi è stata vicina nei momenti più difficili.

Infine, credo sia doveroso ringraziare anche tutti i miei nuovi amici conosciuti a Bologna (in particolare Alessandro e Valerio), i quali hanno reso più piacevole la permanenza nella città di Bologna.

## 1 Introduzione

Gli eventi alluvionali hanno da sempre un forte impatto sulle attività umane, sia a livello di sicurezza e salute del cittadino, che a livello di perdita di beni materiali. Per cercare di limitare i rischi e i danni ad essi associati, si sente la necessità di avere previsioni delle precipitazioni sempre più accurate e affidabili possibili. Spesso si ha a che fare con eventi precipitativi estremi caratterizzati da convezione umida profonda (James et al., 2002; Bryan et al., 2003), e nuovi sforzi sono prodotti per migliorare i sistemi di previsione meteorologica e numerica, poichè vengono richieste adeguate simulazioni dei vari processi, che intervengono sulle diverse scale, e delle loro complesse interazioni. Inoltre, la convezione umida è origine intrinseca di incertezza previsionale, che limita, quindi, la predicibilità di forti precipitazioni, anche nel caso si supponga di avere un modello perfetto e una situazione perfettamente prevedibile a grande scala (Hohenegger e Schär, 2007).

Recenti passi in avanti, specie negli ultimi anni, sono stati effettuati nella comprensione delle dinamiche atmosferiche per lo sviluppo dei modelli numerici di previsione meteorologica, utilizzati con lo scopo di simulare eventi precipitativi estremi, come i cosiddetti flash floods, su aree caratterizzate da orografia complessa. Si è reso necessario, quindi, lo sviluppo di modelli ad area limitata o modelli alla mesoscala, capaci di simulare l'evoluzione atmosferica attraverso un aumento della risoluzione (rispetto ai modelli globali) unito ad un più limitato dominio d'integrazione. In ogni caso, la scelta di aumentare la risoluzione introduce nuovi problemi riguardo alla necessità di ridefinire la descrizione dei processi fisici: ciò non consiste solamente nell'aumentare i punti di griglia e i relativi costi computazionali, ma si concentra soprattutto sul miglioramento della descrizione fisica dei fenomeni, come ad esempio l'interazione dei flussi con orografia particolarmente complessa, la convezione, i processi microfisici e le parametrizzazioni fisiche.

In questo contesto va introdotto il progetto dimostrativo di previsione del WWRP (*World Weather Research Programme* della OMM), denominato MAP D-PHASE (*Mesoscale Alpine Programme, Demonstration of Probabilistic Hydrological and Atmospheric Simulation of flood Events in the Alpine region*), che ha avuto come scopo principale il confronto tra modelli che trattano la convezione umida in modo esplicito finalizzato al miglioramento della previsione quantitativa della precipitazione alla mesoscala, ed in particolare della capacità previsionale di intense precipitazioni ed eventuali episodi alluvionali nella regione alpina. Durante il periodo di 6 mesi del MAP D-PHASE (dal 1 giugno al 30 novembre 2007), sono state effettuate quotidianamente previsioni numeriche e, casualmente, è stato osservato e studiato un evento precipitativo estremo sulla laguna di Venezia: nel mattino del 26 settembre

2007, si formò un sistema convettivo alla mesoscala in un'area di convergenza tra il *Low Level Jet* (LLJ) proveniente da sud-est lungo il Mar Adriatico e un vento di "barriera" da nord-est poco a sud delle Alpi, il quale è stato responsabile delle fortissime precipitazioni (320 mm in meno di 12 ore, 240 mm dei quali in sole 3 ore) che hanno colpito la zona (Davolio et al., 2009).

Per gli scopi scientifici e dimostrativi del progetto, presso l'ISAC-CNR di Bologna, furono implementate due catene operative di previsione numerica, che fornivano previsioni fino a 48 ore sull'intera regione alpina. Tali previsioni, assieme a quelle fornite da altri partecipanti al progetto, contribuirono a definire i livelli di allerta idro-meteorologica e sono utilizzate come input di modelli idrologici.

Le catene modellistiche comprendono il modello idrostatico BOLAM e il modello non idrostatico MOLOCH (innestato in BOLAM), entrambi sviluppati all'ISAC-CNR di Bologna (Buzzi et al., 1994; Buzzi e Malguzzi, 1997; Arena et al., 1998; Buzzi et al., 1998; Buzzi e Foschini, 2000). È stato prodotto, inoltre, un secondo modello idrostatico, GLOBO, utilizzato principalmente per previsioni a medio termine e mensile su tutto il globo.

Gli scopi e gli obiettivi prefissati della tesi sono i seguenti:

- analizzare al meglio i due eventi, su tutte le scale possibili (compatibilmente con la risoluzione consentita dai dati disponibili). Verrà effettuata un'analisi meteorologica a scala sinottica e alla mesoscala dei sistemi convettivi alla mesoscala (MCS, *mesoscale convective system*, Zipser, 1977) che hanno interessato le Cinque Terre il 25 ottobre 2011 e Genova il 4 novembre 2011. Sono stati utilizzati dati di fonte ARPAL, comprensivi di dati GTS (*Global Telecommunication System*) e non, tra cui misurazioni (come ad esempio la precipitazione, la velocità e direzione del vento) attraverso strumenti al suolo e dati radar. Inoltre si sono adoperati gli output dei modelli BOLAM e MOLOCH, al fine di confrontare le diverse performances dei modelli variando, in particolare per quest'ultimo, le risoluzioni orizzontali.

Gli esperimenti utilizzati in questa tesi sono:

1. BOLAM a 10 km di risoluzione orizzontale inizializzato su dati delle analisi (e successive previsioni come condizioni al contorno) NOAA e ECMWF;
  2. MOLOCH, inizializzato su dati delle analisi NOAA, a 3 km, a 2 km, a 1.5 km e a 1 km di passo di griglia;
- confrontare i dati e le analisi con gli output dei modelli (focalizzandosi sulla precipitazione e sulla dinamica dei sistemi convettivi e dell' "ambiente" a mesoscala in cui si sono sviluppati);

- verificare le “prestazioni” dei modelli e, in particolar modo, la sensibilità della quantità di precipitazione prevista (*Quantitative Precipitation Forecasts, QPF*) alla risoluzione utilizzata;
- tentare di individuare eventuali “linee guida” per l’uso operativo/scientifico dei modelli stessi, come ad esempio la qualità o meno della previsione effettuata dal modello con un certo passo di griglia;
- avanzare ipotesi (basate sia sui dati osservati che sui modelli) in relazione ai meccanismi fisici caratterizzanti i due eventi: in particolare verranno esaminati i ruoli giocati dalla presenza del flusso (*outflow*) di aria fredda proveniente dalla *cold pool* presente in Pianura Padana, in relazione con le correnti caldo-umide sud-orientali negli strati più bassi (*Low Level Jet, LLJ*), dalla formazione di una zona di convergenza nella quale è più alta la probabilità che si sviluppino sistemi convettivi organizzati, e dalla conformazione dell’orografia locale, elemento fondamentale per quanto riguarda la formazione, la localizzazione, lo sviluppo ed evoluzione del sistema convettivo a mesoscala (MCS): l’orografia, infatti, può causare l’innesco degli MCS attraverso alcuni processi quali il sollevamento forzato del flusso sul pendio e la formazione di aree di convergenza nel flusso upstream e downstream generate dall’interazione con l’orografia stessa. Può, inoltre, influenzare anche l’effettiva durata ed intensità del sistema convettivo (Davolio et al., 2006; Davolio et al., 2009).

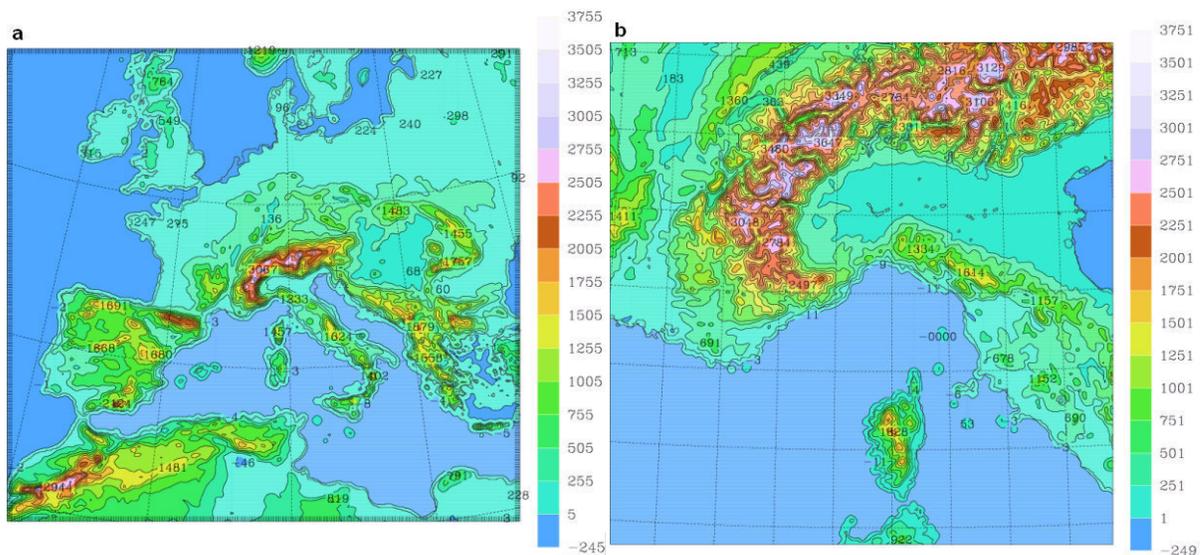


Figura 1: Dominio d'integrazione ed orografia di BOLAM (a) e (b) MOLOCH. L'intervallo tra i colori e i contorni è di 250 m.

## 2 I modelli

A partire dai primi anni '90, all'ISAC di Bologna, sono stati sviluppati diversi modelli meteorologici, principalmente a scopo di ricerca, ma utilizzati anche come strumenti di previsione: BOLAM, MOLOCH e GLOBO.

BOLAM è il primo modello sviluppato presso l'ISAC, a partire dagli anni '90: si tratta di un modello idrostatico ad area limitata che integra le "equazioni primitive", con parametrizzazione della convezione atmosferica. Esso attualmente viene integrato con un passo di griglia di 0.10 gradi (circa 11km), in coordinate geografiche ruotate, con 50 livelli nella verticale e parametrizzazione (Kain-Fritsch) della convezione umida (Fig.1a).

MOLOCH è stato successivamente sviluppato per poter fornire previsioni spazialmente più dettagliate, rappresentando esplicitamente i fenomeni convettivi. Integra nel tempo le equazioni per un'atmosfera non idrostatica e compressibile, con un passo di griglia di 0.0207 gradi, corrispondente a 2.3 km, e 50 livelli (Fig.1b), sebbene in questo lavoro si sia utilizzato il modello ad altre risoluzioni orizzontali, pari a 3 km, a 2 km, a 1.5 km e a 1 km.

Le condizioni iniziali e al contorno necessarie per l'integrazione di MOLOCH sono ottenute a partire dalla previsione di BOLAM.

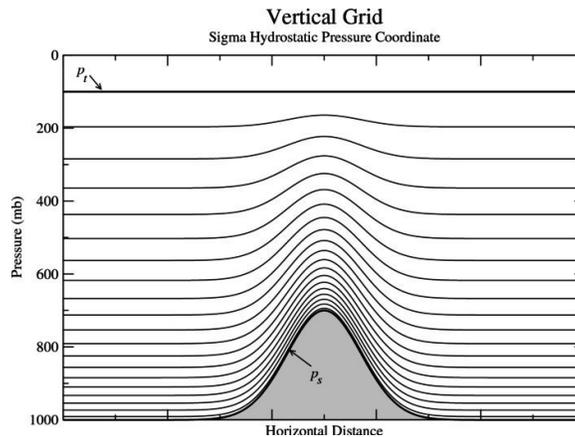


Figura 2: Un modello a 20 strati della coordinata sigma per una montagna idealizzata a forma di campana. La pressione al top,  $p_t$ , è definita in questo caso a 100 hPa, mentre la pressione superficiale *terrain following* è indicata utilizzando la linea spessa nera,  $p_s$ . La pressione al livello del mare è di 1013 hPa. Si ha risoluzione verticale maggiore negli strati più bassi dell'atmosfera.

## 2.1 Il modello BOLAM

Il modello meteorologico BOLAM opera su un'area limitata del globo. Le variabili prognostiche sono le componenti  $u$  e  $v$  del vento, la temperatura assoluta  $T$ , la pressione superficiale  $p_s$ , l'umidità specifica  $q$  e l'energia cinetica turbolenta  $TKE$ . Il ciclo dell'acqua per le precipitazioni stratiformi è descritto dalle medie di cinque ulteriori variabili prognostiche: nube di ghiaccio, nube d'acqua, pioiuga, neve e graupel.

BOLAM ha la capacità di eseguire simulazioni nidificate unidirezionali. La massima risoluzione adatta è limitata dalla approssimazione idrostatica e dalla parametrizzazione della convezione ed è tipicamente intorno ai 6-8 km.

### 2.1.1 Dinamiche del modello

Le variabili prognostiche del modello sono distribuite lungo la verticale su una griglia di Lorenz non regolare (1960), con risoluzione maggiore nello strato limite atmosferico vicino alla superficie.

La discretizzazione verticale è basata su un sistema di coordinate verticali ibride, nel quale la coordinata  $\sigma$  *terrain following* (Fig.2) (in grado cioè di seguire le caratteristiche del terreno) tende gradualmente verso la pura coordinata di pressione all'aumentare dell'altezza dal suolo. La discretizzazione orizzontale è basata su una griglia sfalsata Arakawa-C (Arakawa and Lamb, 1977), nelle coordinate geografiche (latitudine-longitudine). Lo schema di avvezione attualmente implementato è il WAF (*Weighted Average Flux* - Billet and Toro, 1997).

Lo schema di integrazione temporale è di tipo *split-explicit, forward-backward* per i modi di gravità. Lo schema di diffusione orizzontale è del secondo ordine per tutte le variabili prognostiche, eccetto che per la pressione superficiale, e utilizza una tecnica di parallelizzazione basata sulla decomposizione del dominio.

### **2.1.2 Fisica del modello: ciclo atmosferico dell'acqua**

Per quanto concerne la fisica del modello, al suo interno vi sono una serie di componenti e di processi che comprendono il ciclo atmosferico dell'acqua, recentemente revisionato e aggiornato, basato su ipotesi esplicite delle distribuzioni spettrali delle nubi e delle idrometeorie liquide e solide. Le proprietà spettrali delle idrometeorie sono simulate assumendo una distribuzione della funzione gamma generalizzata.

I principali processi descritti dallo schema microfisico sono:

- nucleazione di nube di pioggia (*cw, cloud water*) e di nube di ghiaccio (*ci, cloud ice*);
- condensazione ed evaporazione di *cw*;
- congelamento di *cw*;
- nucleazione, sublimazione e fusione di *ci*;
- auto-conversione di *cw* e di *ci*;
- sublimazione di neve e graupel in entrambe le direzioni;
- raccolta/accrescimento/cristallizzazione (*riming*): 13 processi differenti di interazione fra idrometeorie che coinvolgono la pioggia (congelata o meno), la neve e graupel (secca o fusa), *ci* e *cw*;
- fusione ed evaporazione delle idrometeorie;
- calcolo delle velocità terminali di caduta e del processo di caduta, utilizzando uno schema di integrazione conservativo-diffusivo e di tipo backward-upstream;
- feedback termodinamico basato sulla conservazione dell'entalpia.

Sebbene questo schema sia stato ideato per rappresentare processi di precipitazione principalmente stratiformi (la convezione viene parametrizzata), è stato reso il più possibile coerente con lo schema microfisico implementato nel modello MOLOCH, al fine di assicurare la massima coerenza tra i due modelli che sono in genere eseguiti in cascata.

### **2.1.3 Parametrizzazione della turbolenza e del drag orografico**

Lo strato superficiale e lo strato limite planetario sono modellati in accordo con la teoria della similarità (Monin e Obukhov, 1954). Il modello di chiusura della turbolenza basato

sulla lunghezza di mescolamento (*mixing-length*), ampiamente utilizzato per calcolare i flussi dell'ABL (*Atmospheric Boundary Layer*) per la modellazione atmosferica, viene applicato per parametrizzare la diffusione verticale turbolenta di quantità di moto, calore e umidità. La chiusura della turbolenza è dell'ordine di 1.5 (schema E-1, Zampieri et al, 2005), nella quale viene previsto la *TKE*. Per tener conto degli effetti di galleggiamento per un ABL stratificato, la *mixing-length* studiata da Blackadar (1962) viene utilizzata insieme a funzioni di stabilità che dipendono dal numero di Richardson. Per il caso di ABL instabile, è applicata una versione modificata della lunghezza di mescolamento non locale di Bougeault e Lacarriere (1989). La lunghezza di rugosità è calcolata in funzione della vegetazione e della varianza di orografia sotto griglia. Sul mare viene applicato lo schema di rugosità di Charnock (1955), che prende in considerazione l'altezza dell'onda come funzione della velocità del vento di superficie. La temperatura superficiale del mare (SST) è calcolata, a seconda di flussi di calore latente e sensibile e di flussi radiativi, utilizzando un semplice modello di oceano "a lastra" e nella distribuzione analizzata di SST viene utilizzato un valore di riferimento di rilassamento. Viene applicata, inoltre, una parametrizzazione della "resistenza d'onda" orografica (*orographic wave drag*), associata alla decelerazione del flusso medio passante sopra l'orografia.

#### **2.1.4 Processi relativi alla superficie, al suolo e alla vegetazione**

BOLAM include un modello di suolo che utilizza 4-6 strati, la cui profondità (da pochi cm a oltre 1 m), aumenta verso il basso. Esso calcola l'energia superficiale, la quantità di moto, i bilanci di acqua e neve, il calore e il trasferimento verticale di acqua, gli effetti della vegetazione in superficie (come l'evapo-traspirazione, intercettazione della precipitazione, effetti di avvizzimento) e nel suolo (estrazione di acqua dalle radici) e tiene conto della distribuzione geografica osservata di diversi tipi e parametri fisici del suolo. Il modello comprende anche il trattamento del congelamento dell'acqua e dei processi di fusione all'interno del terreno ed è stato oggetto di vari aggiornamenti negli ultimi anni.

#### **2.1.5 Radiazione atmosferica**

La radiazione atmosferica viene calcolata con l'applicazione combinata dello schema di RG (Ritter e Geleyn, 1992) e di ECMWF (Morcrette, 1991; Mlawer et al., 1997). Poiché la computazione elettronica dei dati per lo schema ECMWF è molto più costosa del regime RG, e pertanto non può essere applicata ad ogni passo e ogni colonna della griglia, è usato su punti alternati tra lunghi intervalli e per effettuare correzioni allo schema RG, quest'ultimo utilizzato in tutti i punti della rete e con modalità di aggiornamento rapido. Nel 2012 lo schema

di radiazione ECMWF è stato aggiornato ad una versione più recente utilizzando l'algoritmo RRTM per le bande visibili e infrarossi (14 canali ciascuno) e la McICA (*Monte-Carlo Independent Column Approximation*) per il calcolo degli effetti radiativi delle nubi (Morcrette et al, 2008). Lo studio di radiazione ECMWF comprende definizioni della "climatologia" (dal punto di vista stagionale e di distribuzioni geografiche) di diversi tipi di aerosol e di composizione atmosferica. In un recente aggiornamento del modello, tutti i dati di input (funzioni astronomiche, aerosol, ozono, gas serra, albedo, emissività e nuvole) sono risultati pienamente coerenti nel confronto tra i due schemi (GR e ECMWF).

## 2.2 Il modello MOLOCH

Il modello MOLOCH (non idrostatico) integra un set di equazioni atmosferiche con le variabili prognostiche (pressione  $p$ , temperatura  $T$ , umidità specifica  $q$ , componenti della velocità verticale ( $w$ ) e orizzontale ( $u, v$ ) del vento, energia cinetica turbolenta ( $TKE$ ), e cinque specie d'acqua per le precipitazioni stratiformi), è rappresentato sulla latitudine-longitudine, ruotato opzionalmente, e basato sulla griglia Arakawa-C. È stato successivamente sviluppato per poter fornire previsioni spazialmente più dettagliate, rappresentando esplicitamente i fenomeni convettivi. Le condizioni iniziali e al contorno necessarie per l'integrazione di MOLOCH sono ottenute a partire dalla previsione di BOLAM (Davolio e Buzzi, 2004).

È ottimizzato per previsioni a breve termine (12-48 h), con risoluzione orizzontale (spaziatura della griglia) compresa tra 1-4 km, con 40-80 livelli atmosferici in verticale. Ai fini della ricerca, è stato testato con risoluzione orizzontale fino a 500 metri e più di 100 livelli. Di recente sono state apportate delle revisioni sulla microfisica del modello e la maggior parte degli aggiornamenti effettuati avevano l'obiettivo di migliorare i risultati, in particolar modo della simulazione della quantità di precipitazione prevista ( $QPF$ ) associata ad episodi di precipitazioni intense di tipo convettivo: è stata così riscontrata una forte sensibilità, in modo diretto o indiretto, con l'evaporazione della precipitazione e le dinamiche della *cold pool*.

### 2.2.1 Dinamiche del modello

Le dinamiche del modello sono integrate nel tempo con uno schema implicito per la propagazione verticale delle onde sonore, mentre vengono utilizzati schemi espliciti, di tipo *time-split*, e *forward-backward* per la propagazione orizzontale.

L'avvezione tridimensionale è calcolata usando lo schema accurato *Weighted Averaged Flux* (WAF), come per il modello BOLAM. Viene incluso, inoltre, un quarto ordine di diffusione orizzontale per evitare accumulo di energia su scale spaziali più piccole.

La condizione al limite sulla topografia è imposta adoperando le coordinate verticali *terrain following*.

Queste coordinate sono implicitamente definite da:

$$\zeta = H \left( 1 - e^{-\frac{z-h(1-\frac{\zeta}{H})}{H}} \right)$$

con  $h(x,y) < z < \infty$ , dove  $H = \frac{R_d T_0}{g}$  è l'altezza di scala.

### 2.2.2 Fisica del modello: ciclo atmosferico dell'acqua

Lo schema microfisico, inizialmente, era basato sulla parametrizzazione proposta da Drofa e Malguzzi (2004). Come per BOLAM, le proprietà spettrali delle idrometeore sono simulate assumendo una distribuzione della funzione gamma generalizzata. I principali processi descritti dallo schema microfisico sono simili a quelli già scritti per BOLAM. In ogni caso, differenze specifiche sono state introdotte in MOLOCH al fine di trattare i processi complessi che caratterizzano i sistemi convettivi. In particolare, MOLOCH ha la capacità di descrivere la cosiddetta microfisica a due-momenti (*two-moment microphysics*), integrando nel tempo la distribuzione spaziale del numero di densità di cw e ci, che descrive l'evoluzione dello spettro delle nubi.

### 2.2.3 Parametrizzazione della turbolenza e del drag orografico

Come visto precedentemente per il modello BOLAM, la chiusura della turbolenza è dell'ordine di 1.5 (schema E-1, Zampieri et al., 2005), in cui viene valutata l'equazione dell'energia cinetica turbolenta (*TKE*), compresa l'avvezione. I flussi turbolenti superficiali di quantità di moto, umidità specifica e di temperatura sono calcolati dalla classica teoria Monin-Obukhov con funzioni Businger/Holtslag nel caso instabile/stabile. La lunghezza di mescolamento viene calcolata dall'energia cinetica turbolenta (Deardorff, 1980) in atmosfera stabile e da Bougeault e Lacarrere (1989), modificato da Zampieri (2004), in ambiente instabile. Per quanto concerne i processi relativi alla superficie, al suolo, alla vegetazione e il calcolo della radiazione atmosferica vengono utilizzati gli schemi già innestati in BOLAM.

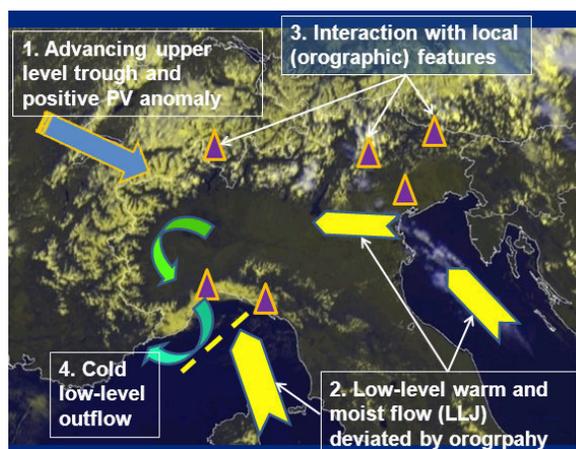


Figura 3: Schema riassuntivo delle caratteristiche comuni che intervengono, di norma, sugli episodi alluvionali che colpiscono la Liguria. (Fonte: ISAC-CNR di Bologna e supporto di F. Grazzini, ARPA Emilia-Romagna).

### 3 Analisi meteorologica degli eventi alluvionali

Esistono alcune caratteristiche che solitamente accomunano i forti episodi di maltempo che colpiscono la Liguria, e che purtroppo accadono piuttosto frequentemente, soprattutto in autunno. Tali circostanze sono state analizzate e vengono tuttora studiate attraverso esperimenti in campo internazionale, come MAP D-PHASE, MEDEX e HyMeX.

I fattori principali sono riassunti in maniera molto schematica in Fig.3 e sono rappresentati dall'avvicinarsi di una depressione atlantica, con fronte freddo associato, verso il bacino occidentale del Mediterraneo, da un'anomalia positiva di vorticità potenziale che si propaga verso sud-est, in prossimità del Golfo del Leone, da un intenso flusso di correnti caldo-umide negli strati più bassi (LLJ) che interferisce con l'Appennino ligure e che viene deviato dall'orografia, dall'eventuale flusso (outflow) di aria fredda proveniente dalla cold pool presente in Pianura Padana e, infine, dalla presenza di anomalie positive delle acque superficiali del mare. La conformazione dell'orografia ligure, in particolare, gioca sempre un ruolo fondamentale circa la formazione, lo sviluppo ed evoluzione dei sistemi convettivi a mesoscala (MCS), che spesso sono responsabili delle intense precipitazioni osservati nella regione.

Sono stati effettuati vari studi sull'argomento (Chu e Lin, 2000; Stein, 2004; Chen e Lin, 2005a; Chen e Lin, 2005b) e le simulazioni a riguardo hanno mostrato che l'innesco della convezione è dovuto alla deviazione del flusso nei bassi livelli indotto dall'orografia.

L'importanza dell'effetto di blocco delle montagne è stato studiato variando l'altezza dei rilievi o la velocità del vento  $U$ . Si è capito, inoltre, che nella fase iniziale del sistema convettivo,

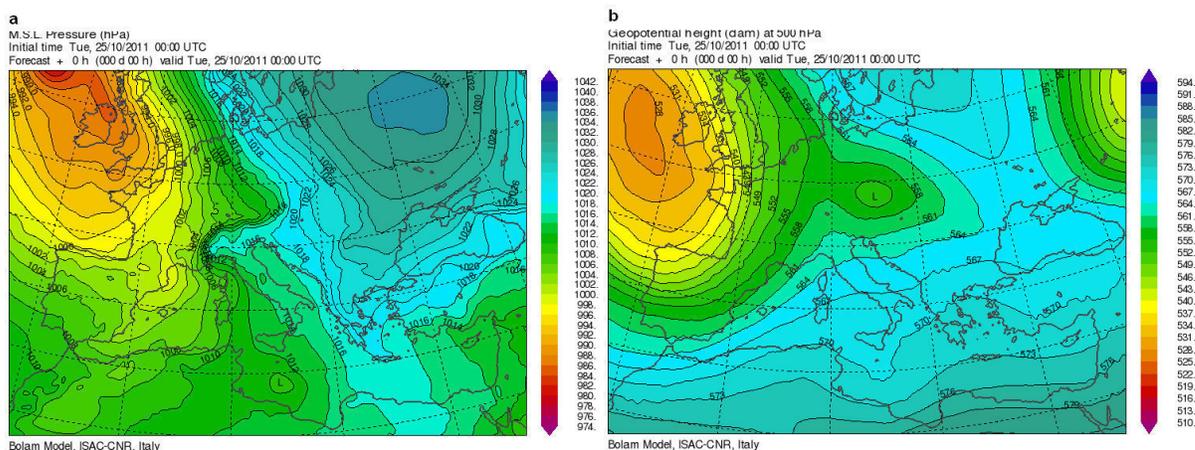


Figura 4: Mappe riferite alle 00 UTC del 25 ottobre 2011: campo di pressione al suolo (a) e (b) di altezza di geopotenziale a 500 hPa del modello BOLAM.

la dipendenza del blocco orografico dal numero di Froude  $F = \frac{Nh}{U}$  (dove  $U$  è, appunto, la misura della velocità del vento,  $h$  è l'altezza tipica della montagna e  $N$  è il fattore di stabilità statica), tenendo in considerazione l'effetto di umidità in caso di saturazione, è ben supportata. È stata fatta la scelta di utilizzare questi due eventi alluvionali come casi studio poiché contengono le caratteristiche tipiche (sopra citate) degli episodi di maltempo che avvengono in Liguria, per cui forniscono ulteriori contributi ad una più profonda comprensione dei meccanismi che si instaurano durante la formazione e lo sviluppo dei suddetti sistemi convettivi alla mesoscala, e rappresentano un'ottima occasione per testare sia a scopo operativo che scientifico la validità dei modelli numerici.

### 3.1 Cinque Terre - 25 ottobre 2011

#### 3.1.1 Analisi a scala sinottica

Il 24 ottobre 2011, sul bordo più orientale dell'Oceano Atlantico, era presente una vasta struttura depressionaria alimentata e supportata da correnti molto fredde di natura artica e posizionata a ovest del Regno Unito. La saccatura associata a tale depressione si estendeva dall'Islanda fin verso le coste del Marocco. Il minimo depressionario di 979 hPa era situato in prossimità delle coste occidentali dell'Irlanda e, con moto retrogrado, nel corso della giornata, si spostava verso nord-ovest andandosi a posizionare a sud dell'Islanda. La saccatura ad esso associata si è gradualmente approfondita ruotando in senso antiorario fino ad entrare sul Mediterraneo (Fig.4b), formando un minimo secondario in prossimità del Golfo del Leone già dalle prime ore della mattinata del 25 ottobre 2011 (Fig.4a).

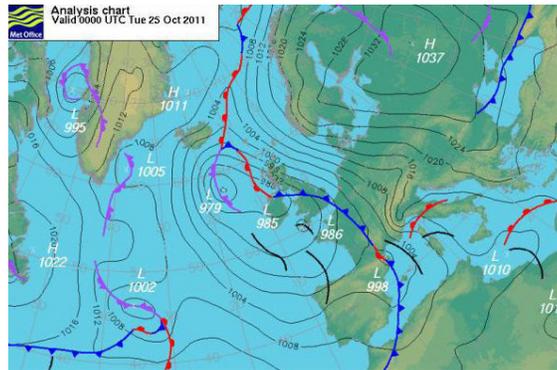


Figura 5: Analisi dei fronti riferita alle 00 UTC del giorno 25 ottobre 2011 (Fonte: Met Office).

Nel frattempo, sull'Europa orientale era presente una vasta area anticiclonica con massimo barico al suolo attorno a 1037 hPa, situato in prossimità dei Paesi Baltici. Sul Mediterraneo occidentale, invece, si è formato un vasto fronte freddo esteso fino a latitudini prossime ai 30°N, mentre la Liguria si è trovata in prossimità del fronte caldo di tale sistema (Fig.5). La configurazione sinottica venutasi a creare ha favorito un'intensa avvezione da sud-ovest di aria caldo-umida di origine subtropicale sul bacino ligure, estesa tra gli strati medi dell'atmosfera fino all'alta troposfera (Fig.6a e Fig.6b).

Il ponente della regione è stato investito da un persistente flusso di aria umida dai quadranti meridionali nei bassi strati, responsabile delle precipitazioni di intensità debole o a tratti moderata. Le piogge su tale porzione di territorio sono state prevalentemente di tipo stratiforme e dovute al sollevamento orografico, per cui l'attività temporalesca è risultata quasi del tutto assente. Sul levante ligure, invece, la situazione è risultata essere completamente diversa e la convezione profonda è stata l'elemento dominante e che ha causato le precipitazioni intense. Tale scenario, visibile fin dalle prime ore del 25 ottobre, è rimasto pressochè immutato per gran parte della giornata, in quanto il moto verso est del fronte freddo è risultato fortemente rallentato dalla presenza del promontorio anticiclonico presente sui Balcani.

Un ruolo importante è da attribuire alla complessa orografia sia quella relativa alle zone colpite dall'evento alluvionale, che a quella del Tirreno: infatti essa costituisce un fattore preponderante per quanto riguarda il rallentamento del flusso incidente, oltre che quello di innesco di sistemi temporaleschi organizzati, attraverso la salita forzata sul pendio del flusso meridionale. Un altro fattore che ha avuto probabilmente una funzione abbastanza importante è l'anomalia positiva delle temperature superficiali del mare, dovuta essenzialmente ad una lunga fase anticiclonica di origine subtropicale che ha coinvolto l'Europa e si è protratta fino a metà ottobre.

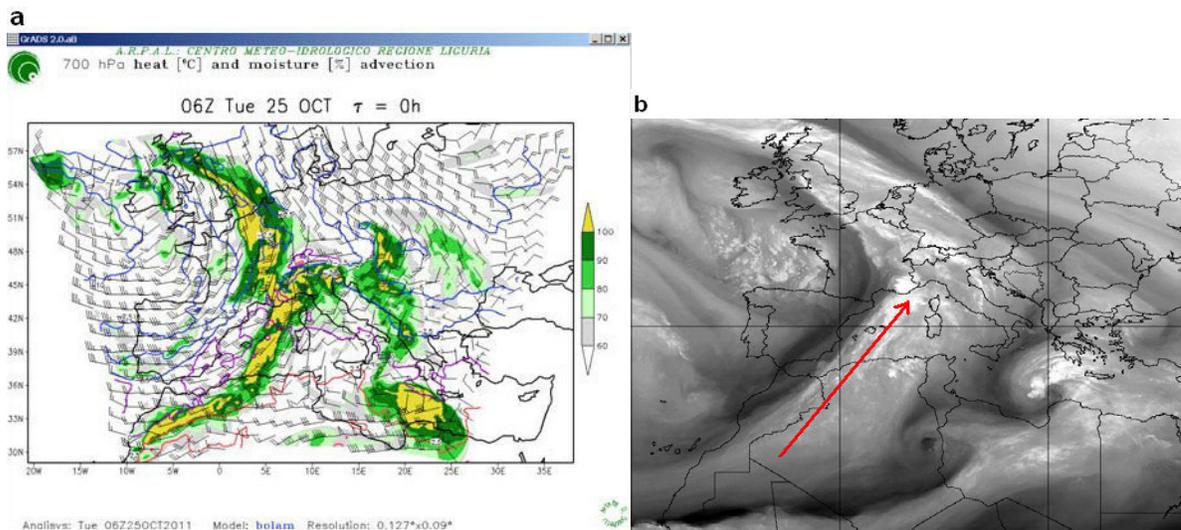


Figura 6: Immagini riferite alle 06 UTC del 25 ottobre: (a) mappa di avvezione di aria umida e temperatura (previsione a +6h del modello BOLAM10 inizializzato alle 00 UTC del 25 ottobre) (Fonte: ARPAL), e (b) immagine da satellite MSG nel canale WV 6.2. In evidenza il corridoio di aria umida, guidato dalla saccatura in quota, esteso dall’Africa occidentale verso il Tirreno.

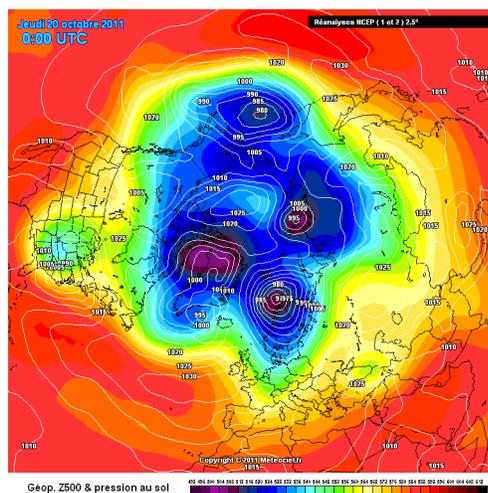


Figura 7: Mappa emisferica di rianalisi dell’NCEP che mostra i valori di altezza di geopotenziale a 500 hPa e di pressione al suolo, riferita al 20 ottobre 2011 (Elaborazione: Meteociel).

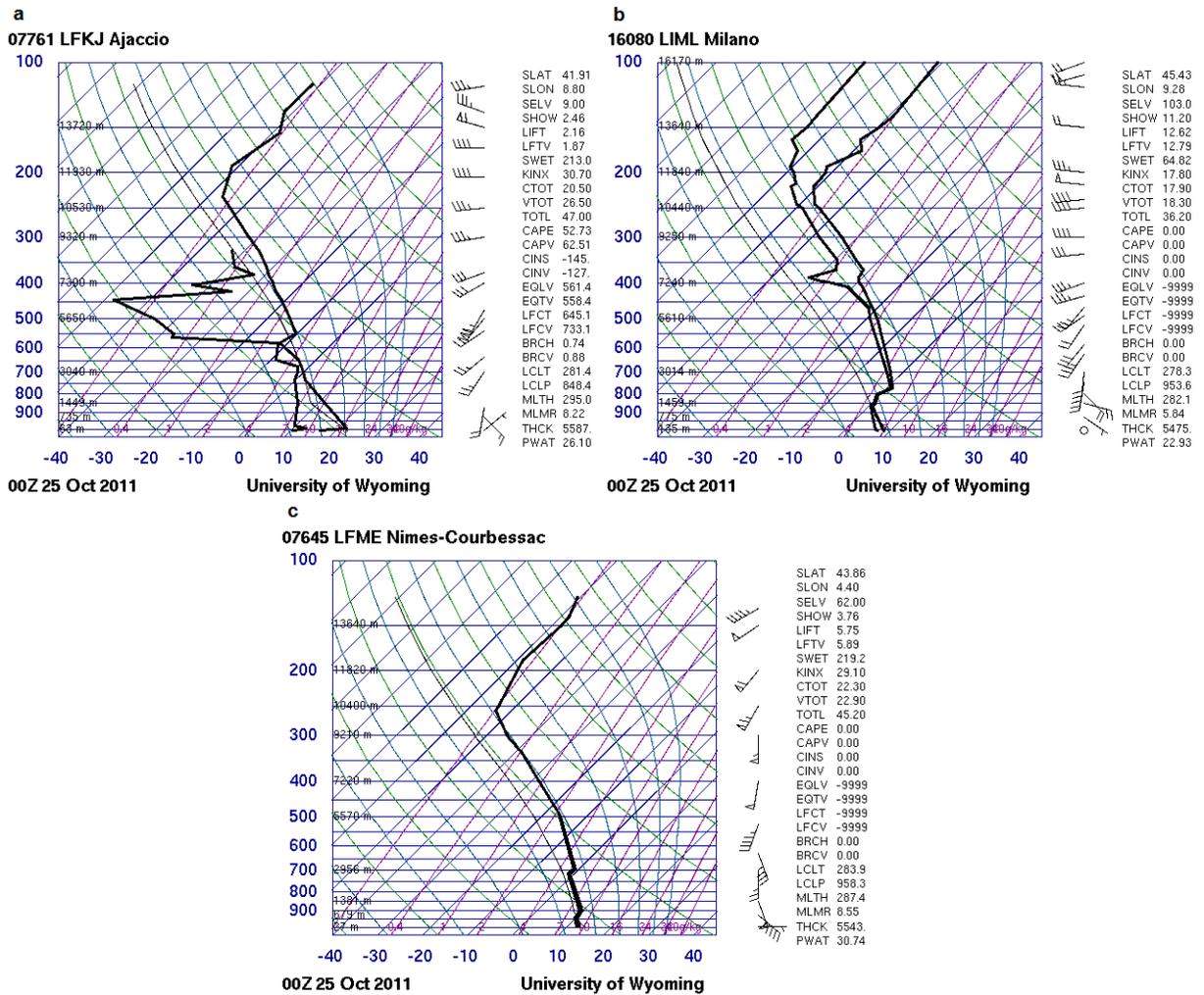


Figura 8: Diagrammi Skew-T riferiti alle ore 00 UTC del 25 ottobre 2011: (a) Ajaccio, (b) Milano Linate e (c) Nimes-Courbessac (Fonte: UWYO).

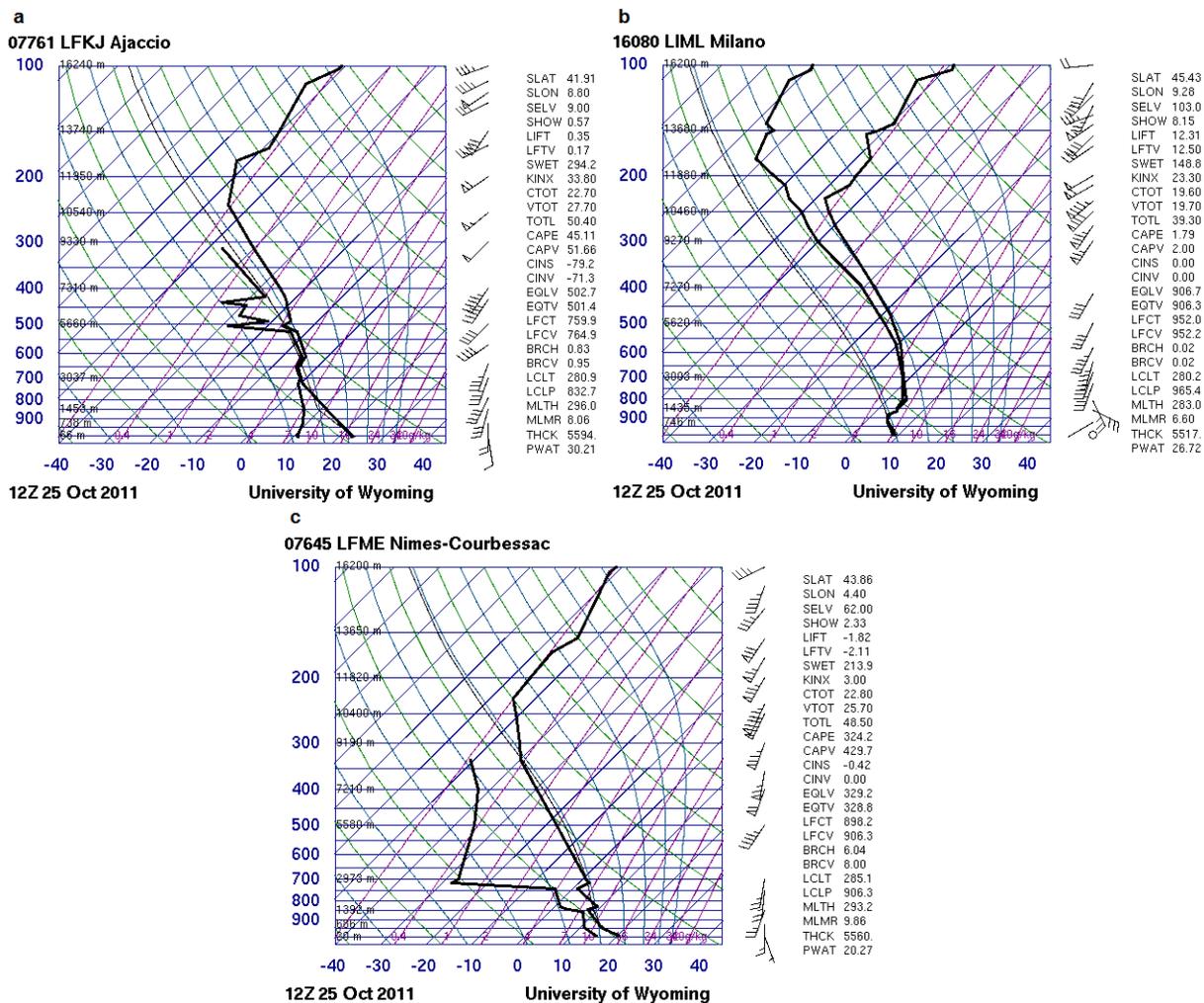


Figura 9: Diagrammi Skew-T riferiti alle ore 12 UTC del 25 ottobre 2011: (a) Ajaccio, (b) Milano Linate e (c) Nimes-Courbessac (Fonte: UWYO).

Inoltre, qualche giorno prima dell'evento, l'Europa centrale e, in misura minore, il nord dell'Italia sono stati interessati da un'avvezione di aria di origine artica (Fig.7), la quale ha comportato un deciso raffreddamento dei bassi strati atmosferici, in particolare in Pianura Padana.

Per avere informazioni sui profili verticali di temperatura, umidità e vento, si sono utilizzati dati provenienti dai radiosondaggi: in particolare i rilevamenti dei venti dal suolo fino ai livelli superiori della troposfera forniscono indicazioni sull'eventuale presenza di shear verticale del vento, parametro favorevole allo sviluppo di sistemi convettivi organizzati.

Tutte le stazioni di radiosondaggio considerate sono localizzate nel settore del Mediterraneo occidentale, quindi sufficientemente vicine alle zone interessate da questi eventi: nel dettaglio si prenderanno in considerazione le stazioni di Ajaccio, di Milano Linate e di Nimes-Courbessac.

Dal radiosondaggio di Ajaccio, relativo alle ore 00 UTC del 25 ottobre 2011 (Fig.8a), si vede come, almeno fino alla quota di 700 hPa, la colonna d'aria fosse relativamente secca (in termini di umidità relativa) e come fossero presenti un flusso da nord-est al suolo e negli strati atmosferici più vicini ad esso, un flusso da sud-est alla quota attorno a 925 hPa circa (infatti è ben visibile il profilo di inversione termica nei bassi strati atmosferici), e un flusso da sud-ovest da quel livello fino alla quota di 320 hPa, confermando il forte shear verticale del vento. Il diagramma skew-T di Milano Linate delle ore 00 UTC (Fig.8b), invece, denota una colonna d'aria quasi satura, e in grado di raggiungere la saturazione alla quota di 800 hPa circa. Dal suolo fino alla quota di 800 hPa i venti provenivano da est, sud-est, mentre al di sopra di essa il flusso umido proveniva da sud-ovest.

Analizzando il diagramma di Nimes, riferito sempre allo stesso orario (Fig.8c), si nota come la colonna fosse satura praticamente a tutte le quote e come il flusso fosse da sud-est dal suolo fino alla quota di 850 hPa, da sud fino a 700 hPa, da sud-est attorno alla quota di 650 hPa e da sud-ovest fino all'alta troposfera.

Confrontando i diagrammi skew-T appena analizzati con quelli riferiti alle ore 12 UTC, quindi ad evento già in atto, si nota come, ad esempio, per Ajaccio (Fig.9a) il flusso nord-orientale delle ore 00 UTC dei bassi strati sia stato sostituito, 12 ore dopo, da quello sud-orientale, mentre dagli 850 hPa in su il flusso rimanga da sud-ovest. Il diagramma di Milano Linate, riferito alle ore 12 UTC (Fig.9b), evidenzia come la colonna d'aria si sia ulteriormente umidificata nel corso della mattinata, raggiungendo la saturazione già alla quota di 900 hPa circa, mentre il radiosondaggio di Nimes delle ore 12 UTC (Fig.9c) ci illustra, invece, una colonna d'aria ormai più secca nei bassi strati, la quale non raggiunge la saturazione neppure negli strati più alti, e la rotazione del vento dai quadranti sud-occidentali già dalla quota di 850 hPa circa, evidenziando come il minimo in quota si fosse già spostato verso est.

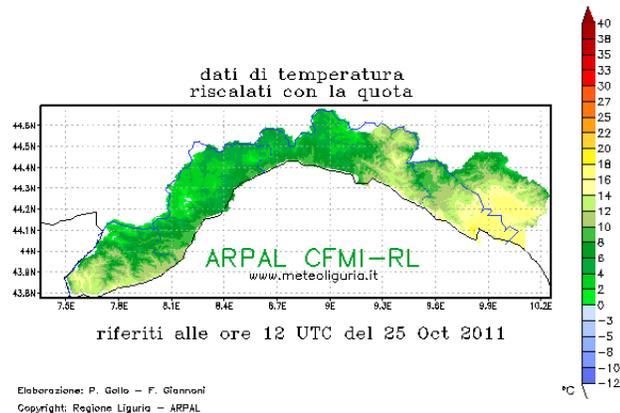


Figura 10: Mappa di temperature al suolo riferita alle 12 UTC del 25 ottobre (dati della rete di misura OMIRL). Si evidenzia la forte differenza di temperatura tra lo spezzino, interessato da un intenso flusso di scirocco, ed il settore centrale della regione, interessato da forti venti di Tramontana (Fonte: ARPAL).

### 3.1.2 Analisi alla mesoscala

Per comprendere i meccanismi che hanno consentito la formazione e lo sviluppo del sistema convettivo, bisogna analizzare la configurazione ad una scala più limitata. Innanzitutto, la conformazione del Golfo Ligure e la presenza di un'orografia complessa a ridosso del mare sono risultati elementi fondamentali per la convergenza di un'imponente quantità di umidità nei bassi strati.

Ha avuto un ruolo determinante la presenza dell'alta pressione sulle regioni adriatiche e quella poi formatasi successivamente "in loco" sulla Pianura Padana, a causa dell'accumulo di aria fredda nei bassi strati come conseguenza dell'irruzione di aria fredda dal nord Europa, avvenuta diversi giorni prima dell'evento: le isobare, infatti, evidenziavano la formazione di una sorta di "naso" sul nord Italia (Fig.11) che, associato alla presenza del minimo sul Golfo del Leone, ha determinato un marcato gradiente barico proprio sul Mar Ligure, richiamando dalla Pianura Padana aria fredda nei bassi strati.

La Liguria è stata quindi interessata da due regimi di flusso profondamente diversi: sul settore centro-occidentale, forti venti di Tramontana che hanno indotto un sensibile abbassamento delle temperature e, sul settore di Levante, correnti calde meridionali che hanno determinato temperature prossime ai 20 °C, al di sopra della media del periodo. Il contrasto risulta particolarmente evidente anche analizzando la mappa di temperatura osservata riferita alle 12 UTC del 25 ottobre (Fig.10).

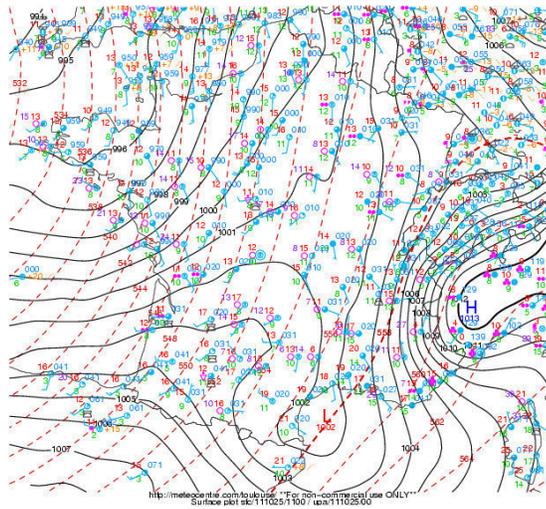


Figura 11: Mappa di osservazioni al suolo riferite alle 11 UTC del 25 ottobre. (Elaborazione: Meteocentre.com)

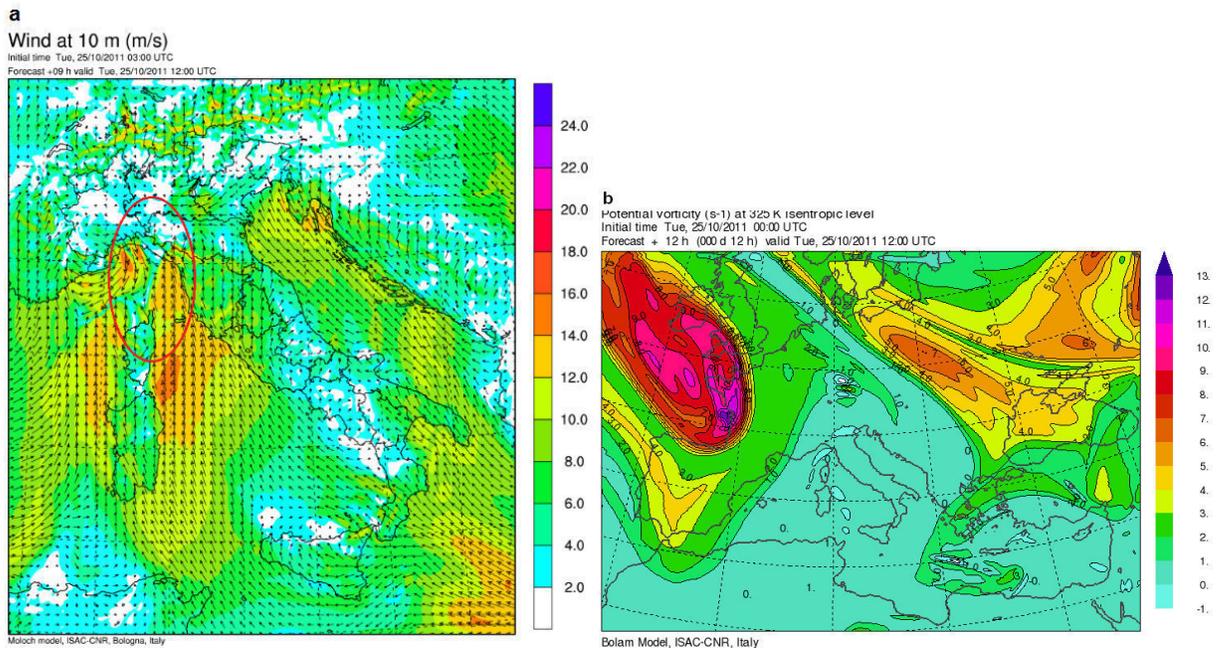


Figura 12: Mappe riferite alle ore 12 UTC del 25 ottobre 2011: campo di vento a 10 m previsto da MOLOCH a 2.3 km di passo di griglia inizializzato alle 03 UTC (previsione a +9h) del 25 ottobre (a) e (b) campo di vorticità potenziale a temperatura potenziale di 325 K (previsione a +12h del modello BOLAM inizializzato alle 00 UTC del 25 ottobre). In evidenza la linea di convergenza del flusso sul settore centro-orientale del Golfo Ligure.

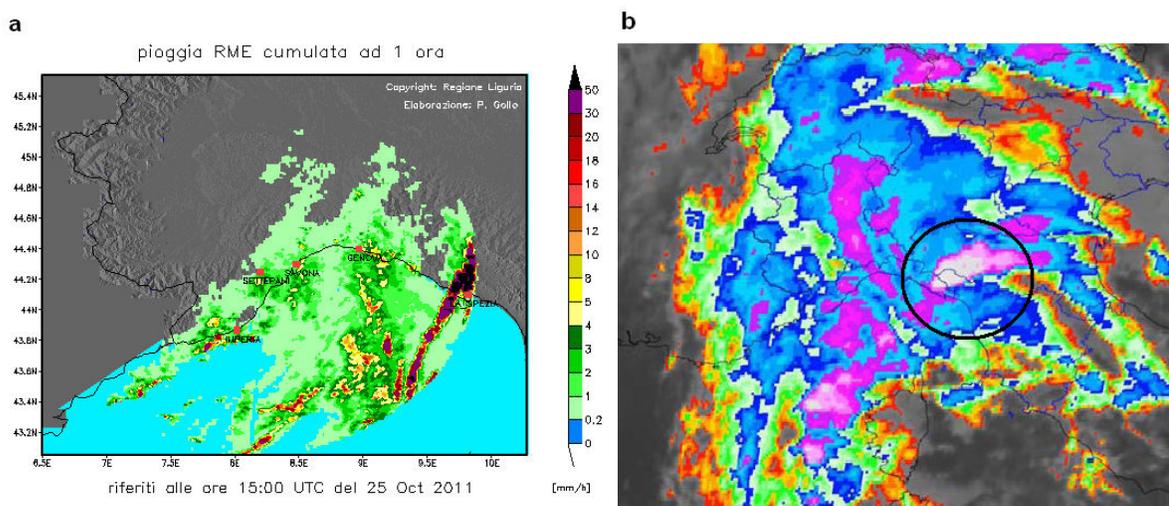


Figura 13: Mappa di pioggia oraria stimata cumulata ad 1 ora riferita alle 15 UTC (a) e (b) immagine dal satellite MSG (canale IR 10.8) riferita alle 12 UTC del 25 ottobre 2011. In evidenza la fase iniziale del sistema temporalesco autorigenerante a “V” con la parte più fredda del top delle nubi (viola-bianco) localizzata sull’estremo levante ligure (Fonte: ARPAL).

È verosimile, inoltre, che la presenza della cold pool nel settore centro-occidentale della regione abbia effettuato un’ulteriore azione di blocco nei confronti dello scirocco impedendone così la sua espansione verso ovest. Tra il Golfo del Tigullio e le Cinque Terre si è venuta a creare una zona di convergenza tra il flusso umido meridionale lungo il Tirreno ed il flusso da nord, relativamente secco, ad ovest del Monte di Portofino, diffidente sul Golfo in modo tale da disporsi da ovest, sud-ovest proprio in prossimità del promontorio di Levanto (Fig.12a). In Fig.12b, in particolare in alto a sinistra, si nota una zona di forte anomalia positiva di vorticità potenziale presente sull’ovest europeo e in lento avvicinamento verso il Mediterraneo. Il risultato è stato la formazione di una sorta di linea frontale, quasi stazionaria, che ha favorito forti moti ascendenti, innescando lo sviluppo di un sistema temporalesco sulla zona (Fig.13a). Il radar in banda C a doppia polarizzazione del Monte Settepani (localizzato sul crinale dell’Appennino approssimativamente a 100 km a sud-ovest della regione di interesse) permette una maggior comprensione della morfologia del MCS (Fig.14a): le sezioni sud-nord e sudovest-nordest mostrano chiaramente la struttura obliqua del sistema (Fig.14b e Fig.14d), mentre la sezione est-ovest raffigura il sistema precipitante, con contorni abbastanza ben definiti, a forma di V (*V-shape*), con riflettività che supera la soglia di 40 dB (Fig.14c). La struttura a V, inoltre, è ben evidente nell’immagine satellitare nel canale infrarosso relativa alle ore 12 UTC del 25 ottobre (Fig.13b).

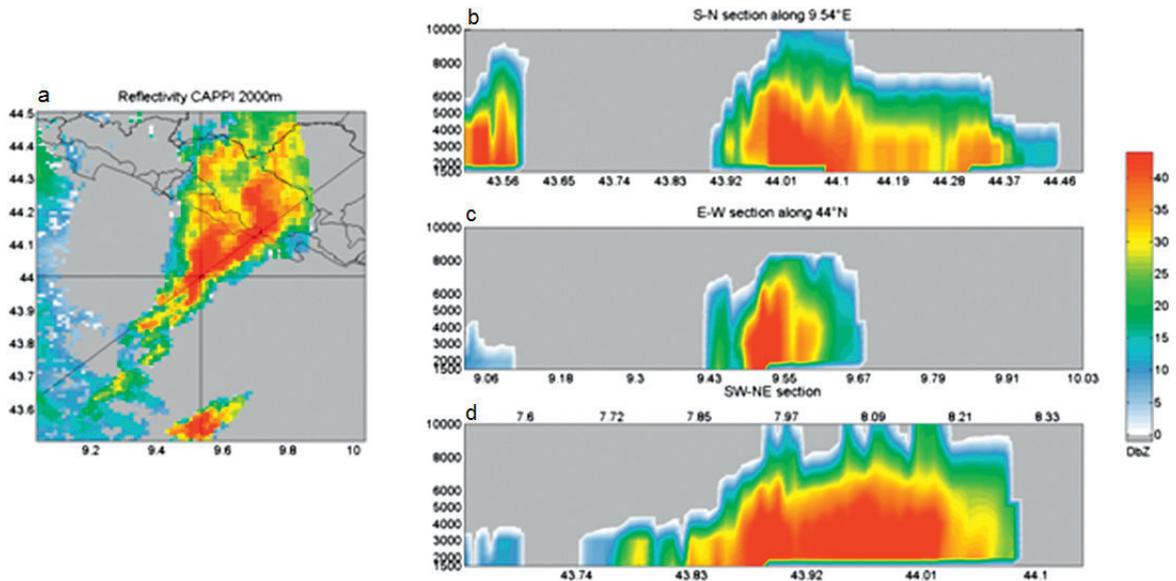


Figura 14: Mappe di riflettività radar raffiguranti la struttura della precipitazione relative alle ore 10 UTC del 25 ottobre 2011: (a) indicatore posizionato su un piano ad un'altezza costante di 2000 m (CAPPI), (b) sezione sud-nord, (c) sezione est-ovest, (d) sezione sudovest-nordest (Fonte: CIMA).

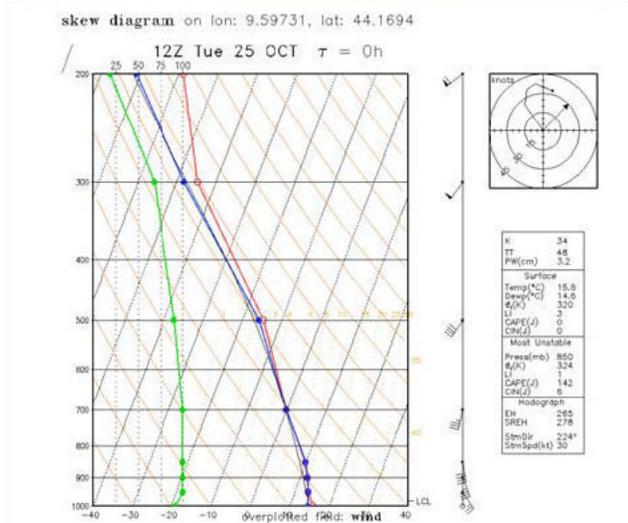


Figura 15: Diagramma Skew-T riferito ad un punto griglia del modello Moloch rappresentativo di Levante, punto di origine del sistema temporalesco a “V” che ha interessato Val di Vara e Cinque Terre (analisi del modello Moloch inizializzato alle 12 UTC del 25 ottobre). In evidenza il marcato shear verticale del vento, parametro favorevole allo sviluppo di sistemi convettivi organizzati.

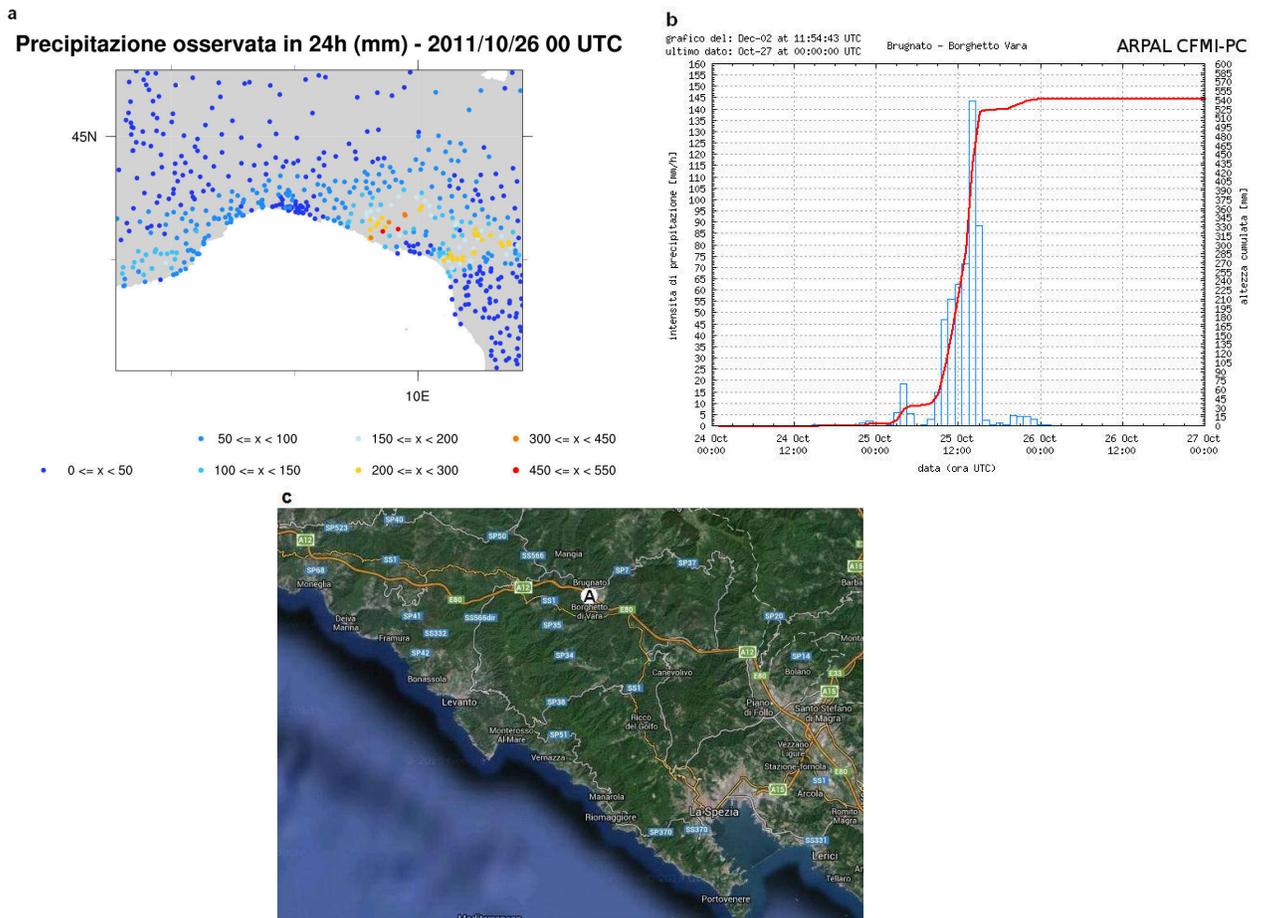


Figura 16: Mappa di precipitazione osservata in Liguria in 24h riferita alle 00 UTC del 26 ottobre 2011 (a), (b) ietogramma e cumulata a Brugnato-Borghetto Vara (Fonte: ARPAL), e (c) mappa satellitare per la geolocalizzazione di Brugnato-Borghetto Vara (indicatore A) (Fonte: Google Maps).

Grazie anche al supporto del forte shear verticale del vento (Fig.15) ed alla presenza di correnti diffluenti in quota legate alla vicinanza del jet, il sistema, divenuto autorigenerante, ha assunto presto una struttura organizzata a mesoscala con una configurazione a "V", allungata dal mare in direzione nord-orientale verso l'entroterra spezzino.

Solo in serata, il fronte principale legato alla saccatura atlantica si è spostato verso est, nord-est, andando ad interessare l'alta Val di Magra e la Lunigiana, producendo anche su tali aree ingenti quantitativi di pioggia, mentre lentamente i fenomeni andavano attenuandosi sul Levante ligure.

A conferma dell'intensità dell'evento, si evidenzia che, tra le 9 e le 15 UTC del 25 ottobre, il pluviometro di Borghetto Vara (comune di Brugnato - SP) ha registrato valori di 144 mm in 1 ora, 330 mm in 3 ore, 472 mm in 6 ore e 539 mm in 24 ore (Fig.16 a-b-c).

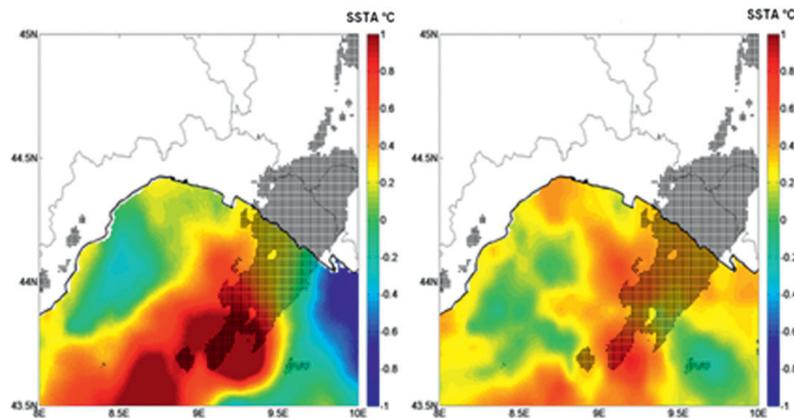


Figura 17: Mappe raffiguranti le anomalie delle SST prodotte dal JPL ROMS (a sinistra) e (a destra) dal CNR MED e zona di precipitazione cumulata (regione ombrata), superiore ai 50 mm, osservata nelle 24 ore del 25 ottobre 2011 (Fonte: articolo di Reborà et al., 2012, CIMA).

Si sottolinea inoltre che rimane al momento aperta la valutazione quantitativa del ruolo giocato dall'anomalia di temperatura superficiale del Mediterraneo (valutabile, nel periodo in esame, tra 0.5 °C e 1.0 °C), derivante da un autunno particolarmente mite, che potrebbe aver influito significativamente sui flussi di calore e di energia tra il mare e l'atmosfera. Tale valutazione può essere effettuata attraverso simulazioni modellistiche post-evento, ipotizzando diverse condizioni di partenza e al contorno.

Il ruolo delle temperature superficiali delle acque tropicali del nord Atlantico (*Sea Surface Temperature*, SST) nel guidare l'attività delle tempeste tropicali è stato discusso e valutato estesamente in letteratura (Landsea, 1999; Trenberth, 2005), così come è stato esplorato in dettaglio nel caso di tempeste alle medie latitudini sull'area del Mediterraneo (Lebeaupin et al., 2006; Millan et al., 1995). Valori più alti delle SST comportano un aumento dei flussi di calore tra la superficie del mare e l'aria, i quali a loro volta inumidiscono e destabilizzano lo strato limite atmosferico marino determinando un aumento dell'energia disponibile e di umidità per la convezione atmosferica e, quindi, per la precipitazione.

In questo contesto, l'analisi delle SST viene intrapresa per ottenere una più profonda comprensione delle proprietà spatio-temporali di questi eventi e il possibile ruolo delle interazioni mare-atmosfera nell'innescare e guidare gli eventi torrenziali. In particolare si è fatto riferimento ad un lavoro di Reborà et al., uscito nel 2012: le anomalie delle SST relative al 25 ottobre 2011 sono mostrate in Fig.17: il pannello di sinistra riproduce lo schema del Global 1-km *Sea Surface Temperature* (GISST, Chao et al., 2009) prodotto quotidianamente dal gruppo della *Propulsion Laboratory Regional Ocean Modeling System Jet* (JPL ROMS),

mentre il pannello di destra mostra il lavoro effettuato dal *Consiglio Nazionale delle Ricerche Sea Surface Temperature L4* (CNR MED SST L4), prodotto e distribuito quasi in tempo reale nel quadro del progetto *MyOcean del Global Monitoring for Environment and Security* (GMES) presso l'Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima-Gruppo di Oceanografia da Satellite (ISAC-GOS). Entrambi i prodotti relativi alle anomalie sono calcolati utilizzando la climatologia di 5 giorni della temperatura della superficie del mare del CNR, costruita dalla versione 5 *Pathfinder dell'Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR), utilizzando un set di dati nel periodo di tempo 1985-2004 (Marullo et al., 2007). Sebbene l'uso di questi prodotti sia limitato dalla mancanza di dati di ingresso delle SST provenienti da sensori a microonde quando la nuvolosità è particolarmente significativa, essi rimangono un utile strumento per una descrizione qualitativa di uno scenario molto probabile delle SSTA. Entrambi i pannelli mostrano un'anomalia positiva di temperatura nella parte centrale del Mar Ligure: i due insiemi di dati offrono diversi modelli di SSTA e ciò può essere attribuito alle diverse tecniche di fusione dati adottate (Chao et al., 2009; Buongiorno Nardelli et al., 2013) e al fatto che, per G1SST sul Mar Mediterraneo, i dati di osservazione del *Geostationary Operational Environmental Satellite* (GOES) non sono disponibili. Tuttavia, per entrambi i prodotti sono evidenti un'importante struttura a vortice anticiclonica e diverse strutture minori distribuite nella parte centrale del bacino. Nella Fig.17, la mappa delle SSTA viene sovrapposta con l'impronta dell'accumulo di precipitazione derivata dal radar: la principale anomalia positiva delle SST si trova nella parte nord-orientale del bacino, da cui il sistema convettivo alla mesoscala, secondo gli autori dell'articolo, sembra aver avuto origine. Diversi altri studi hanno però evidenziato, al fine di comprendere meglio il ruolo delle SST, come sia necessario avere in tal proposito dati più approfonditi e su scale temporali e spaziali lunghe.

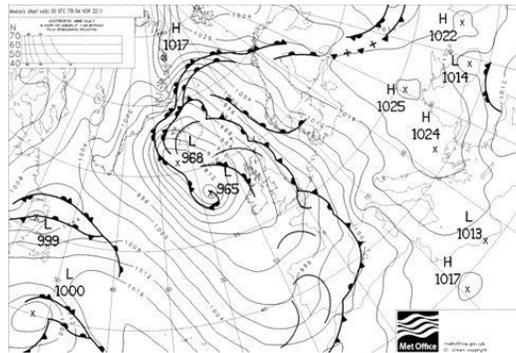


Figura 18: Analisi dei fronti al suolo di Bracknell riferita alle 00 UTC del 4 novembre 2011 (Elaborazione UK Met Office). Il fronte freddo si trova sul Golfo del Leone e la Liguria è esposta a fenomeni prefrontali.

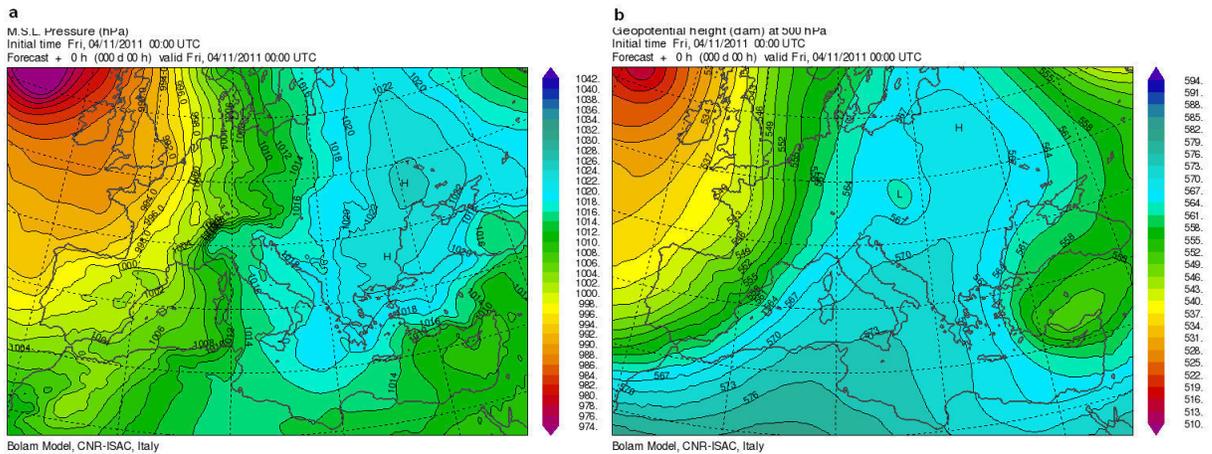


Figura 19: Mappe riferite alle 00 UTC del 4 novembre 2011: campo di pressione al suolo (a) e (b) campo di altezza di geopotenziale a 500 hPa del modello BOLAM.

## 3.2 Genova - 4 novembre 2011

### 3.2.1 Analisi a scala sinottica

Una profonda e vasta struttura depressionaria, avente valori di geopotenziale molto bassi e proveniente dal nord Atlantico, ha determinato precipitazioni molto intense prima sulla Francia meridionale (nel periodo compreso tra l'1 e il 4 novembre) ed in seguito sull'area tirrenica (tra il 4 e il 9 novembre). Essa si era sviluppata da una pre-esistente struttura ciclonica, rinvigorita dapprima dall'arrivo del ciclone responsabile della precoce nevicata che ha interessato la costa est degli Stati Uniti tra il 29 ed il 30 ottobre 2011 e, successivamente, da un secondo vortice di aria fredda in quota proveniente dall'Alaska.

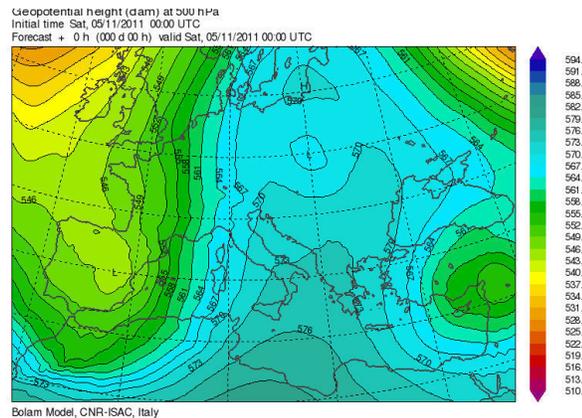


Figura 20: Mappa dei valori di altezza di geopotenziale a 500 hPa del modello BOLAM riferita alle 00 UTC del 5 novembre 2011.

Nei giorni precedenti l'evento, la saccatura ad essa associata si estendeva a latitudini relativamente basse, arrivando fino al Marocco, favorendo così un flusso di aria umida di origine subtropicale sul Mediterraneo. Il minimo di pressione, del valore di 965 hPa, era situato a nord-est dell'Irlanda e a sud dell'Islanda. Nel contempo, sull'Europa orientale si registrava la presenza di un solido promontorio anticiclonico con valore massimo di pressione al suolo di 1025 hPa sull'Ucraina (Fig.18). Inoltre l'anticiclone, sotto la spinta della saccatura in avanzamento, si è ulteriormente consolidato fino a 1031 hPa espandendosi verso nord.

Mentre le correnti in quota, in particolare a 500 hPa, sulla Liguria erano da sud-sud ovest, la configurazione barica nei bassi strati richiamava verso il Mediterraneo occidentale e centrale un intenso flusso di correnti sciroccali (Fig.19a e Fig.19b) fino circa alla quota di 700 hPa.

Venerdì 4 novembre si assisteva ad un ulteriore approfondimento della saccatura atlantica su Marocco e Algeria, nel suo lento avvicinamento al Mediterraneo centrale: l'asse di tale saccatura (quasi bloccata nella sua traslazione verso est, in concomitanza con il progressivo rafforzamento della pressione sull'Europa orientale) tendeva gradualmente a ruotare in senso antiorario disponendosi, a fine giornata, in direzione NO/SE (Fig.20).

Analizzando, infine, i radiosondaggi per le tre località prese in esame, otteniamo un quadro ancora più chiaro della situazione venutasi a creare quel giorno, soprattutto avendo a disposizione dati sui profili osservati di umidità e di vento in quota durante l'evento di Genova. Il radiosondaggio di Ajaccio delle ore 00 UTC (Fig.21a) ci mostra, similmente all'evento delle Cinque Terre, come la colonna d'aria fosse relativamente secca, e come sia presente il flusso nord-orientale al suolo e nei bassi strati, mentre salendo di quota si riscontrano venti da sud-est (infatti è ben visibile il profilo di inversione termica nei bassi strati atmosferici),

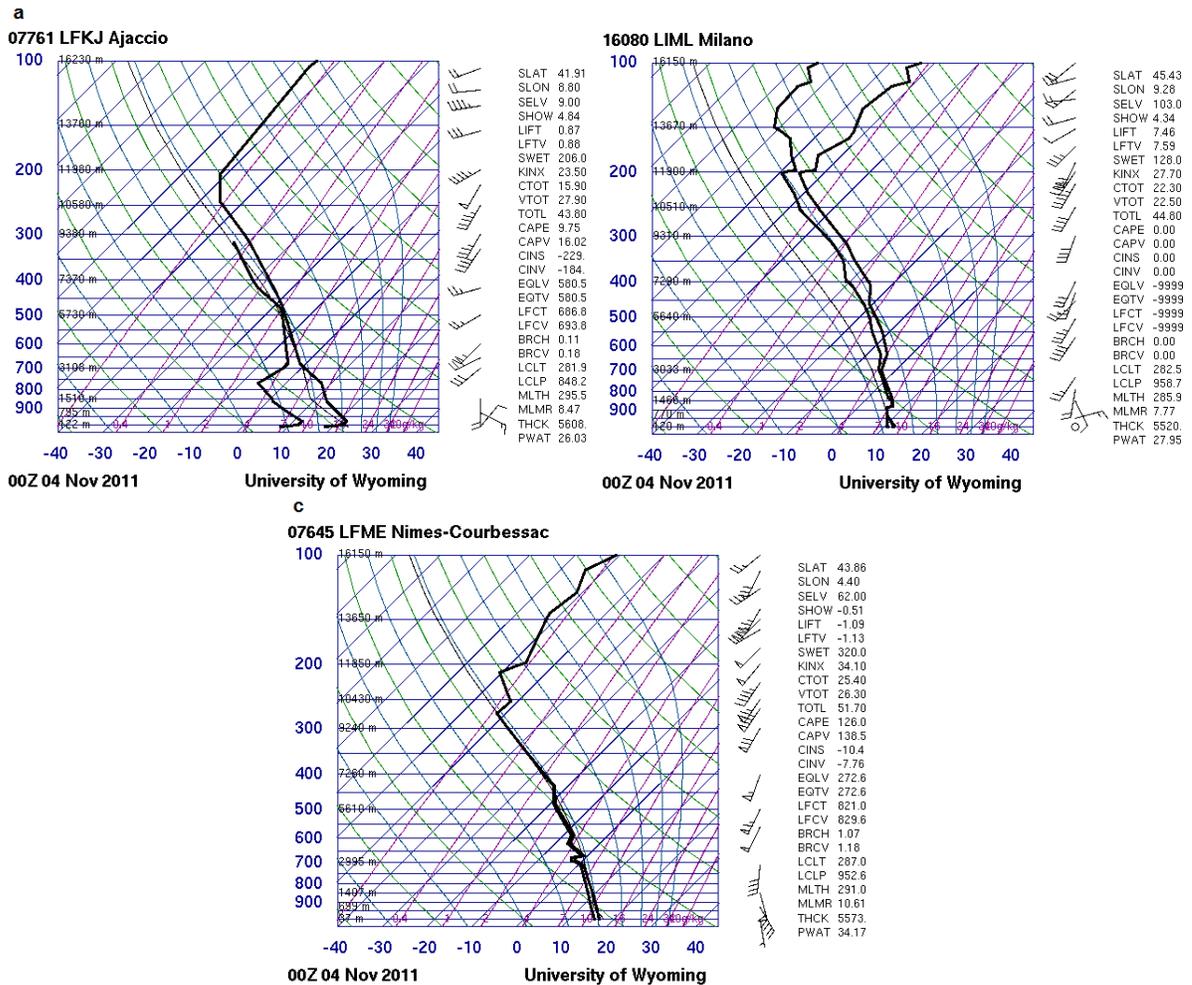


Figura 21: Diagrammi Skew-T riferiti alle ore 00 UTC del 4 novembre 2011: (a) Ajaccio, (b) Milano Linate e (c) Nimes-Courbessac (Fonte: UWYO).

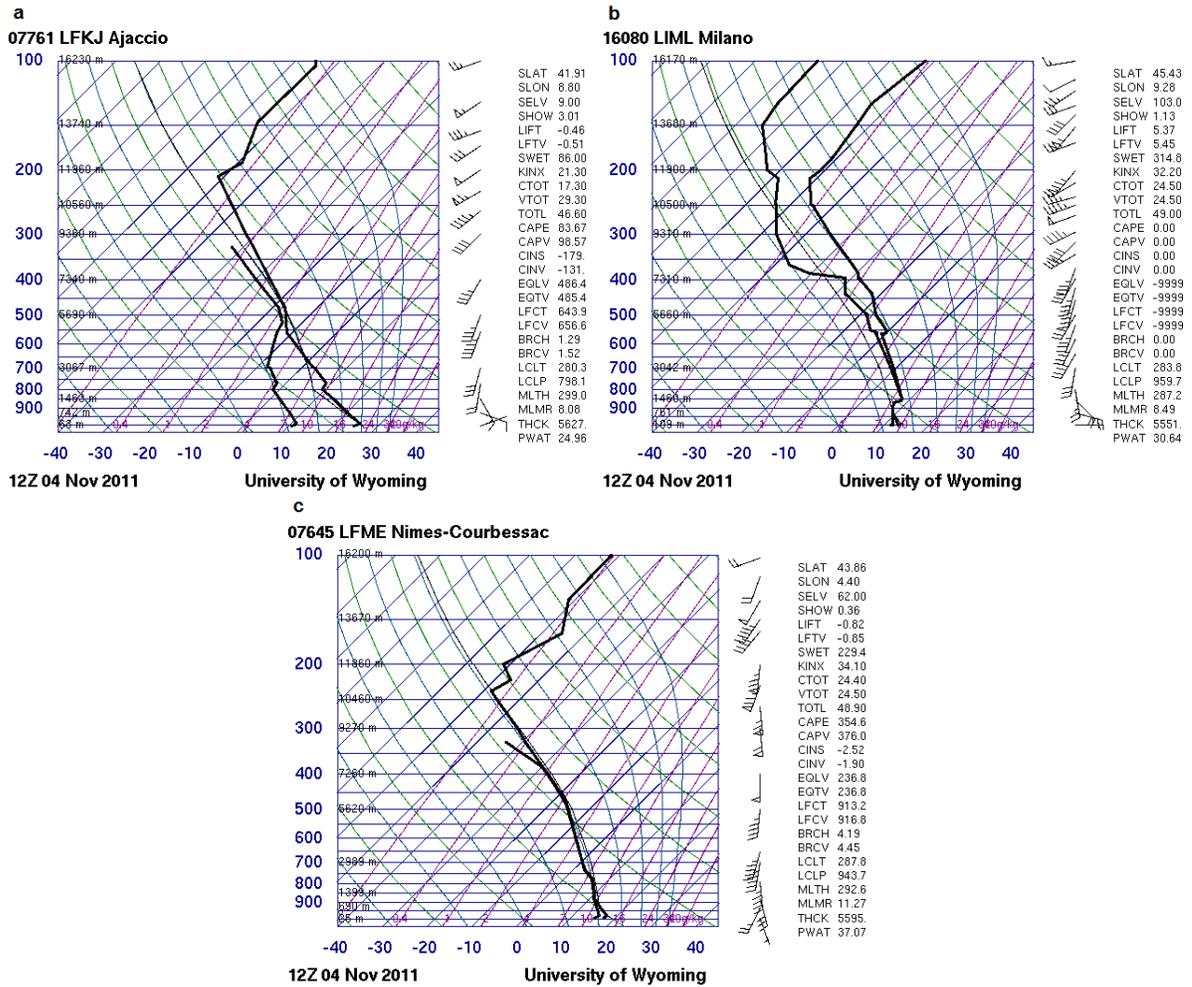


Figura 22: Diagrammi Skew-T riferiti alle ore 12 UTC del 4 novembre 2011: (a) Ajaccio, (b) Milano Linate e (c) Nimes-Courbessac (Fonte: UWYO).

e successivamente, dalla quota di 750 hPa circa, venti da sud-ovest. Il diagramma di Milano Linate, sempre allo stesso orario (Fig.21b), mette in evidenza una colonna d'aria decisamente più umida, che raggiunge la saturazione già alla quota di 900 hPa, e si osserva come dal suolo fino alla stessa quota il flusso fosse sud-orientale, e dagli 850 hPa fino all'alta troposfera fosse sud-occidentale.

Anche per quanto riguarda il radiosondaggio di Nimes (Fig.21c), si evince come il flusso nei bassi strati fosse da sud-est mentre dalla quota di 700 hPa in su avesse provenienza da sud-ovest. Risulta essere ben evidente, anche in questo caso, il forte shear verticale del vento.

È utile osservare i profili atmosferici, per queste tre stazioni, anche ad evento in corso e, più precisamente, alle ore 12 UTC: dal diagramma di Ajaccio (Fig.22a) si vede come continui ad esserci, anche se più sottile rispetto a 12 ore prima, uno strato di inversione termica; anche la direzione dei venti lungo tutta la colonna pare essere rimasta alquanto inalterata rispetto al radiosondaggio precedente. Dal diagramma di Milano Linate relativo alle ore 12 UTC (Fig.22b) si evince che il flusso nei bassi strati rimane sempre sud-orientale ma risulta essere più intenso rispetto a quello delle ore precedenti. Infine, dal radiosondaggio di Nimes delle ore 12 UTC (Fig.22c) si nota come la colonna d'aria inizi a saturare attorno ai 900 hPa di quota e come rimanga tale lungo tutto il profilo.

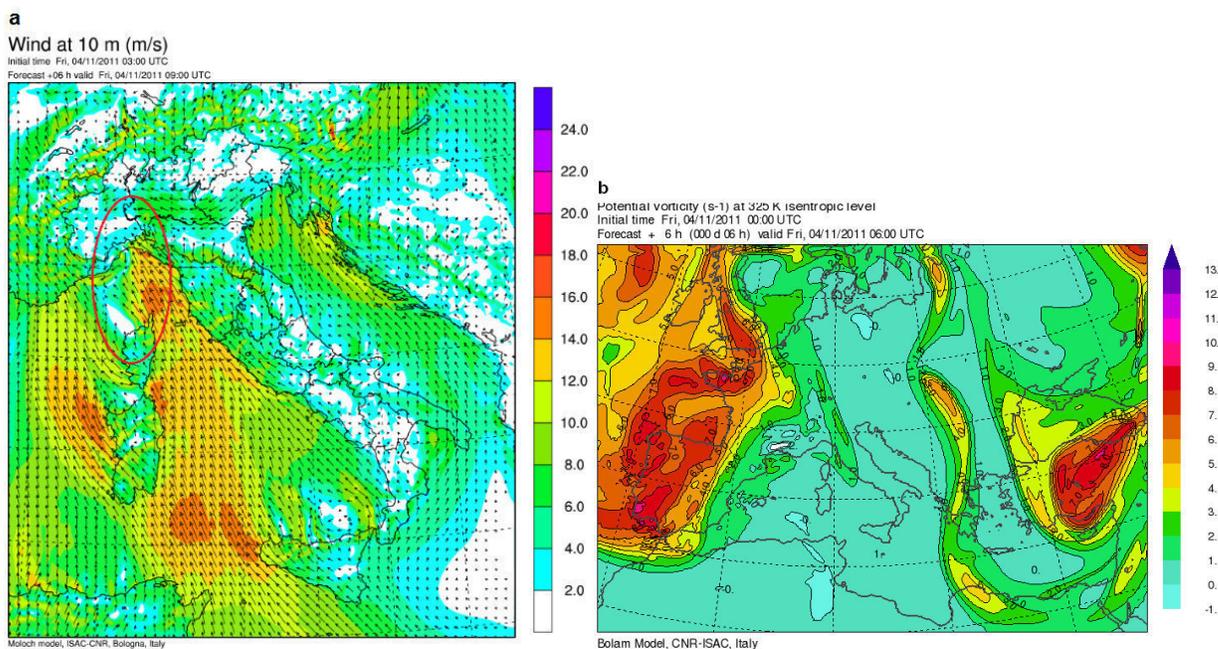


Figura 23: Mappe di simulazione del campo di vento a 10 m previsto da MOLOCH a 2.3 km di passo di griglia inizializzato alle 03 UTC (previsione a +6h) del 4 novembre (a) e (b) del campo di vorticità potenziale a temperatura potenziale di 325 K (previsione a +6h di BOLAM inizializzato alle 00 UTC del 4 novembre). In evidenza la linea di convergenza del flusso sul settore centro-orientale del Golfo Ligure.

### 3.2.2 Analisi alla mesoscala

Anche in questo caso, per capire a fondo la situazione che si è venuta a creare, bisogna analizzare la configurazione ad una scala più limitata col fine di analizzare i fattori determinanti per la formazione e la stazionarietà del sistema convettivo che ha interessato in particolare il levante genovese. L'ulteriore approfondimento della saccatura in quota, avvenuto durante la mattina del 4 novembre, ha determinato un ulteriore rinforzo dello Scirocco al suolo ed un sostenuto richiamo di aria che si arricchisce di vapore acqueo nel suo lungo tragitto sul Mediterraneo. In tale situazione la convergenza del flusso umido su una zona della costa molto ristretta, nelle zone di massima diffluenza in quota e di massima convergenza dei venti nei bassi strati ha giocato un ruolo fondamentale nel mantenere attivo il temporale organizzato per alcune ore, favorendo la persistenza di precipitazioni di intensità molto forte su un'area relativamente limitata. Si tratta di un fenomeno la cui localizzazione è determinata da diversi fattori quali la zona di convergenza fra il vento da sud-est e quello dai quadranti settentrionali in uscita dalle valli genovesi (alimentato dal particolare "vento di barriera" sulla Pianura

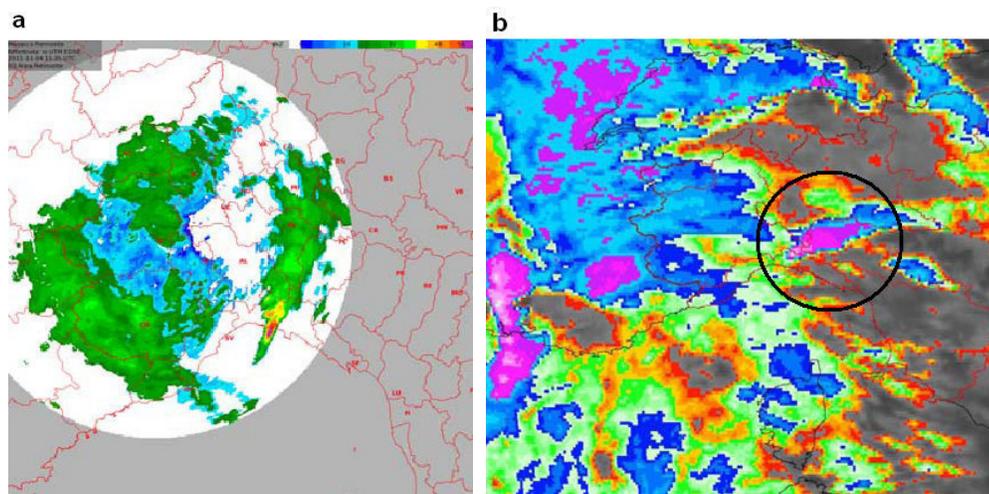


Figura 24: Mappa di riflettività riferita ore 11.35 UTC del 4 novembre (a) (mosaico del Radar meteorologico di Bric della Croce - elaborazione ARPA Piemonte) e (b) immagine dal satellite MSG, canale IR 10.8, riferita ore 11:40 UTC del 4 novembre. In evidenza il temporale organizzato con la parte più fredda del top delle nubi (viola-bianco) localizzata sopra la parte orientale della città di Genova.

Padana). Ulteriori elementi da tenere in considerazione sono il downdraft associato al sistema convettivo e l'evaporazione della precipitazione, i quali tendono a rinforzare la cold pool ad ovest di Genova (Fig.23a). Come nel caso delle Cinque Terre, è presente un'anomalia positiva di vorticità potenziale sull'ovest europeo e in lento avvicinamento verso il Mediterraneo (Fig.23b). Si sviluppano, così, intensi fenomeni temporaleschi quasi stazionari favoriti anche dalla particolare conformazione orografica della zona. Già nella serata del 3 novembre il deciso aumento dell'instabilità e la convergenza del flusso verso la costa ligure hanno innescato fenomeni temporaleschi prefrontali anche se di moderata intensità sul capoluogo ligure.

Gli episodi convettivi hanno raggiunto il culmine nelle prime ore del mattino di venerdì 4 novembre quando un temporale organizzato si è innescato in prossimità del Monte di Portofino e lentamente si è spostato verso ovest, andando a interessare nella mattinata Recco e, verso fine mattinata, la zona urbana di Genova (Fig.24a e Fig.24b).

In particolare, le precipitazioni associate a tale sistema temporalesco autorigenerante hanno insistito soprattutto sulla Valle Sturla, sulla Val Bisagno e sul versante est della Val Polcevera, andando a determinare massimi orari fino a quasi 170 mm e cumulate in 6 ore di 385 mm e di 466 mm in 24 ore a Vicomorasso, comune di Sant'Olcese, mentre a Campo Ligure si sono registrati precipitazioni cumulate in un'ora di 121 mm e in 24 ore di 442 mm (Fig.25a, Fig.25b, Fig.25c e Fig.25d).

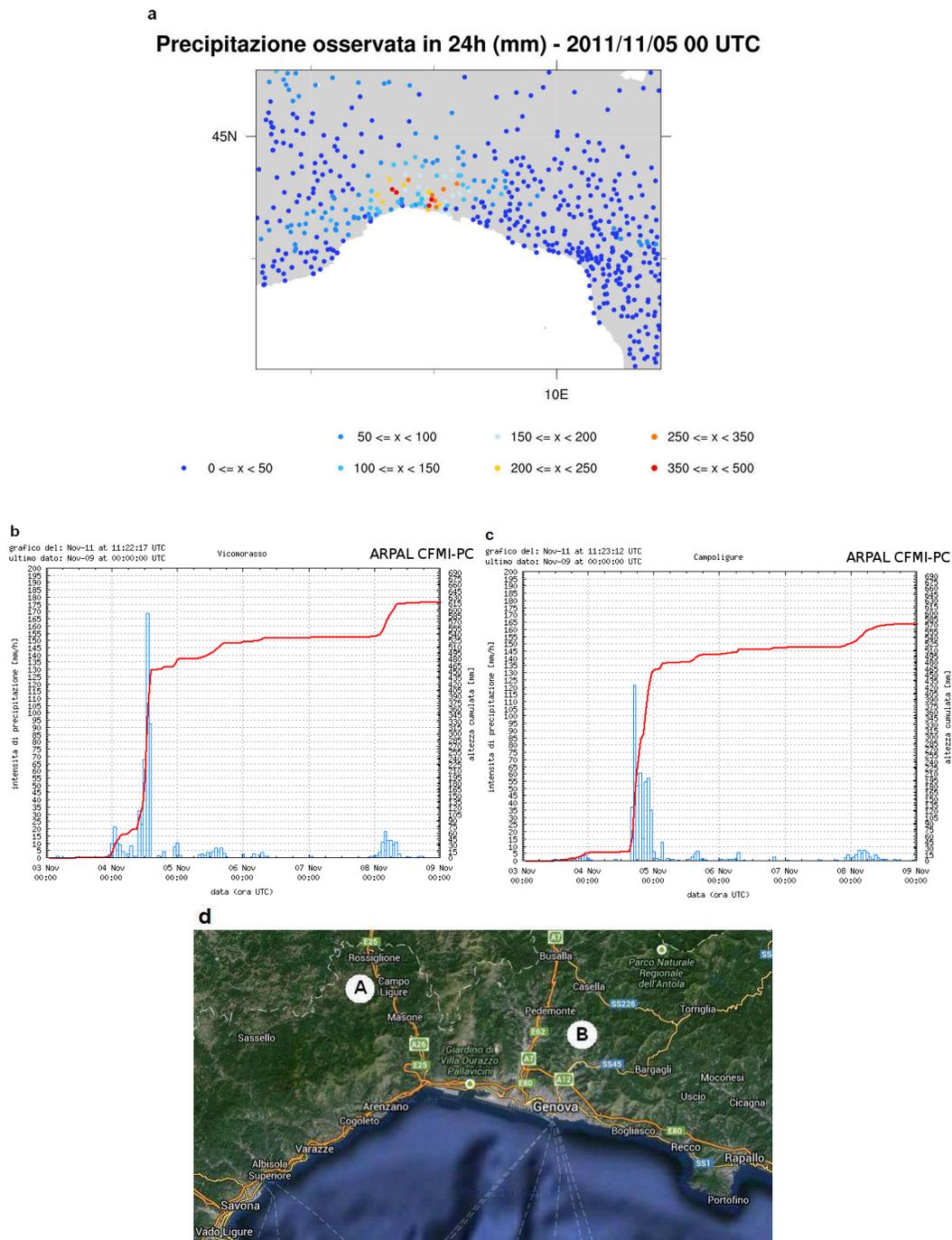


Figura 25: Mappa di precipitazione osservata in Liguria in 24h riferita alle 00 UTC del 5 novembre 2011 (a), (b) ietogramma e cumulata a Vicomorasso, (c) a Campo Ligure (Fonte: ARPAL) e (d) mappa satellitare per la geolocalizzazione di Campo Ligure (indicatore A) e di Vicomorasso (indicatore B) (Fonte: Google Maps).

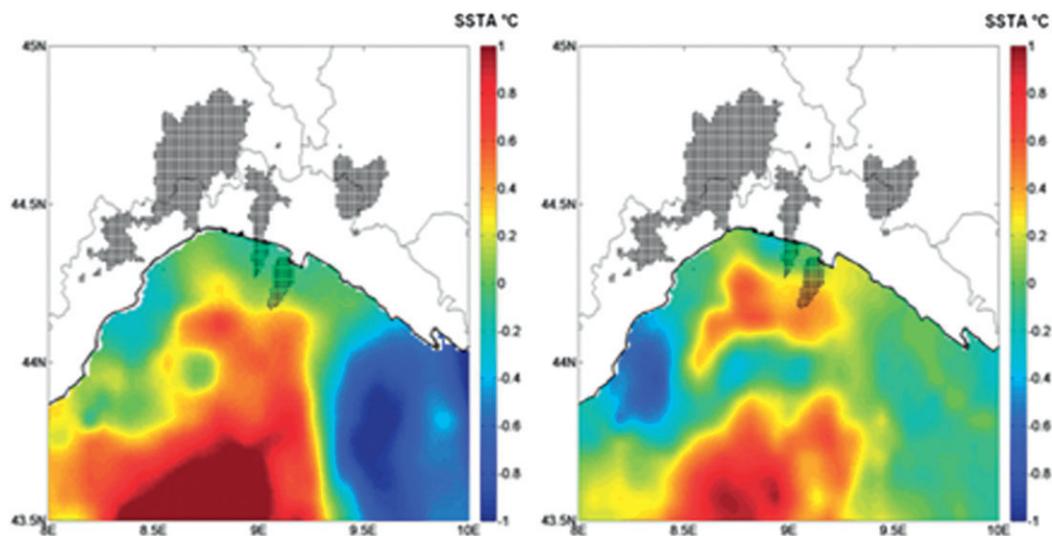


Figura 26: Mappe raffiguranti le anomalie delle SST prodotte dal JPL ROMS (a sinistra) e (a destra) dal CNR MED e zone di precipitazione cumulata (regioni ombrate) superiore ai 50 mm, osservata nelle 24 ore del 4 novembre 2011 (Fonte: articolo di Rebora et al., 2012, CIMA).

Infine, per quanto concerne lo studio sulle anomalie delle SST del 4 novembre si rende necessario constatare che sfortunatamente, il radar più vicino localizzato sul Monte Settepani, in Liguria, è risultato essere solo parzialmente operativo per un certo intervallo di tempo, in particolare durante la prima fase dell'evento, a causa di problemi tecnici. Il radar più vicino che è riuscito ad osservare la situazione è situato nei pressi di Torino (Bric della Croce, Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente della Regione Piemonte) e localizzato a più di 100 km dal sistema convettivo. La bassa qualità dell'osservazione è principalmente dovuta all'eccessiva distanza combinata con l'attenuazione e al blocco/ombra che subisce il fascio di onde a causa dell'orografia.

Le mappe delle anomalie delle SST del 4 novembre 2011 sono rappresentate in Fig.26: come per il caso delle Cinque Terre, si nota, in entrambi i pannelli, una principale anomalia positiva posizionata sulla parte centrale del bacino ligure con diverse strutture minori caratterizzate da valori altrettanto positivi, distribuiti sempre sulla zona centrale del bacino ma più in prossimità della costa, in particolare nel settore in cui si è formato il sistema convettivo davanti al promontorio di Portofino, poi spostatosi più ad ovest, verso il capoluogo ligure.

Il collegamento tra anomalia e origine del sistema precipitante sembra essere presente anche in questo caso, anche se appare in qualche modo più debole rispetto all'evento delle Cinque Terre. È necessario, però, ricordare che il radar più vicino al temporale è stato solo parzialmente operativo durante la prima parte dell'evento: per questa ragione lo schema precipitante è stato molto sottostimato, così come la localizzazione del suo punto di origine ha subito una maggior incertezza rispetto al caso del 25 ottobre 2011. Come precedentemente affermato, sarebbe più utile uno studio delle SST (più che delle anomalie delle SST) che prendesse in esame, per un maggior intervallo di tempo, una più ampia porzione di mare.

## **4 Analisi dei dati osservati al suolo**

Lo studio approfondito di un evento meteorologico estremo, in generale, non può prescindere dall'analisi dei dati osservati con l'utilizzo, principalmente, di stazioni meteorologiche situate al suolo. Si è voluto, infatti, verificare l'effettiva evoluzione nello spazio e nel tempo dei parametri fisici più importanti, grazie al supporto dei dati di fonte ARPAL. In particolare, sono state prese in considerazione alcune variabili atmosferiche quali la temperatura, la precipitazione, la direzione e l'intensità dei venti, focalizzando l'attenzione sul nord Italia ed estremo sud-est della Francia. Infine sono stati utilizzati dati misurati da radiosondaggi effettuati ad Ajaccio (Corsica), Milano Linate e Nimes, località posizionata di fronte al Golfo del Leone, in Francia, al fine di mostrare i forti shear verticali del vento e i livelli di umidità relativa sulla colonna d'aria. È stato utilizzato il programma NCL\_NCAR per la creazione di grafici e per la visualizzazione dei dati su mappe.

### **4.1 Trattamento dei dati ARPAL**

I dati osservati e misurati al suolo erano inseriti in files di testo, dunque facilmente trattabili, e consistevano in una fitta rete di dati di tipo GTS (per quanto riguarda le stazioni meteo europee), e non GTS (per le stazioni meteo italiane) relativi a pluviometri, termometri, igrometri e anemometri, e per ogni tipologia di sensore erano indicati la latitudine, la longitudine, l'altitudine, il nome della stazione e l'osservazione. Tuttavia si è presentata una serie, seppur esigua, di anomalie e/o di errori dovuti probabilmente a stazioni momentaneamente fuori uso o malfunzionanti. Per quanto riguarda, ad esempio, i dati di precipitazione relativi alla cumulata oraria scritta originariamente in decimi di mm (trasformata in mm) e di temperatura, ovvero la media oraria scritta in decimi di grado (trasformata in grado), sia nel caso delle Cinque Terre che in quello di Genova, si è dovuto eliminare quelli relativi a tre stazioni meteorologiche (due italiane e una francese) in quanto indicavano valori visibilmente errati, dovuti probabilmente al malfunzionamento dei sensori applicati per questi tipi di dati.

Come per i dati di precipitazione e di temperatura, anche per i dati di vento al suolo si è reso opportuno eliminare alcuni valori di stazioni (in tutto nove) palesemente errati o che si trovavano parecchio vicine tra loro.

Inoltre è stato necessario effettuare dei calcoli in modo tale che potessero essere utilizzati correttamente dal programma di grafica NCL, usato specificatamente per la trattazione dei dati di vento: infatti i dati in possesso, per l'anemometro di ogni stazione meteorologica, consistevano nel modulo del vento (per l'intensità, scritti in decimi di km/h) e l'angolo (per la direzione, scritti in gradi), entrambi mediati sulle singole ore.

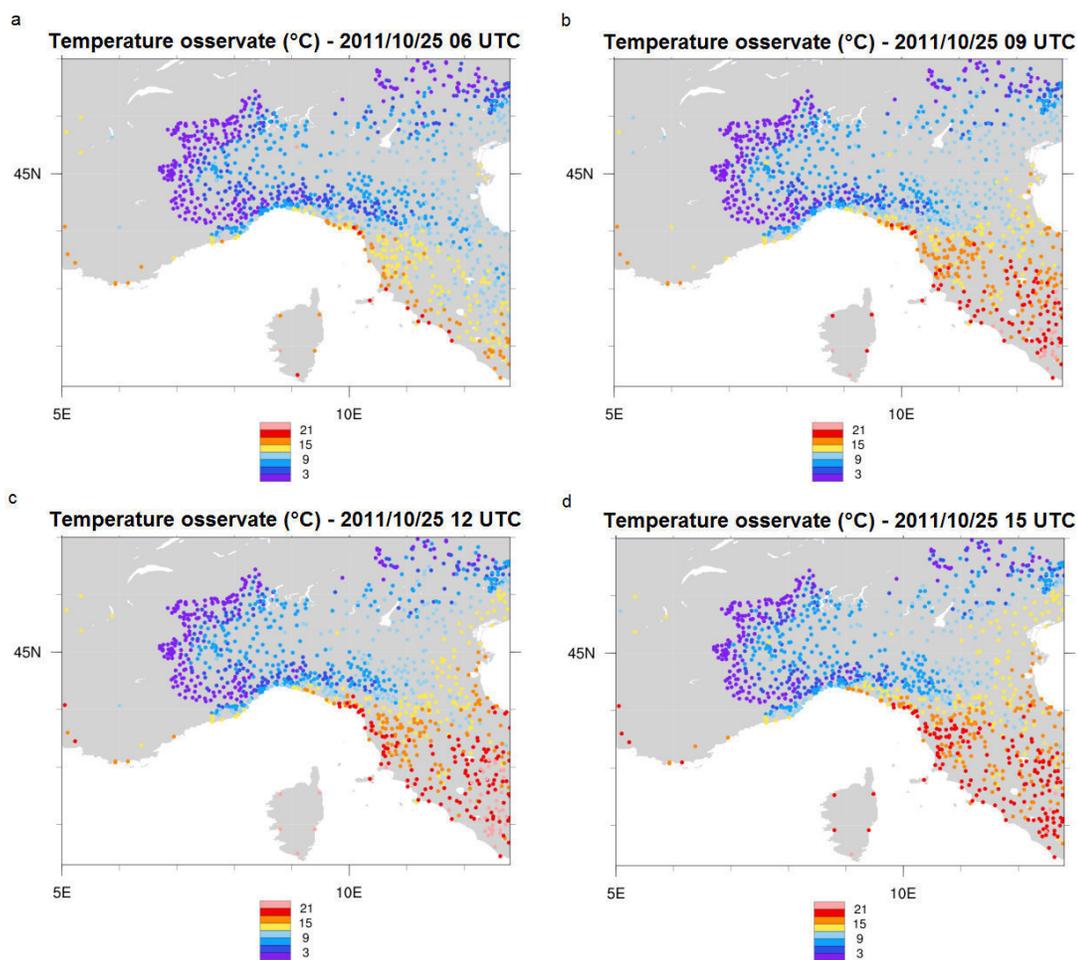


Figura 27: Mappe di evoluzione nel tempo della temperatura misurata al suolo riferite alle ore 06 UTC (a), (b) alle ore 09 UTC, (c) alle ore 12 UTC, e (d) alle ore 15 UTC del 25 ottobre 2011 (Fonte: ARPAL).

Il programma utilizzato, di cui sopra, era settato per elaborare i valori delle componenti  $u$  e  $v$  del vento (orizzontale e verticale), per cui si è reso necessario effettuare i calcoli opportuni per trasformare i dati dal formato originale a quello previsto in ingresso dall'applicazione.

## 4.2 Evento delle Cinque Terre

Analizzando, in primo luogo, il parametro della temperatura misurata al suolo il giorno 25 ottobre 2011 (Fig.27a, Fig.27b, Fig.27c e Fig.27d) e focalizzando l'attenzione in particolare sulla Liguria (Fig.28a, Fig.28b, Fig.28c e Fig.28d), si può riscontrare in modo evidente

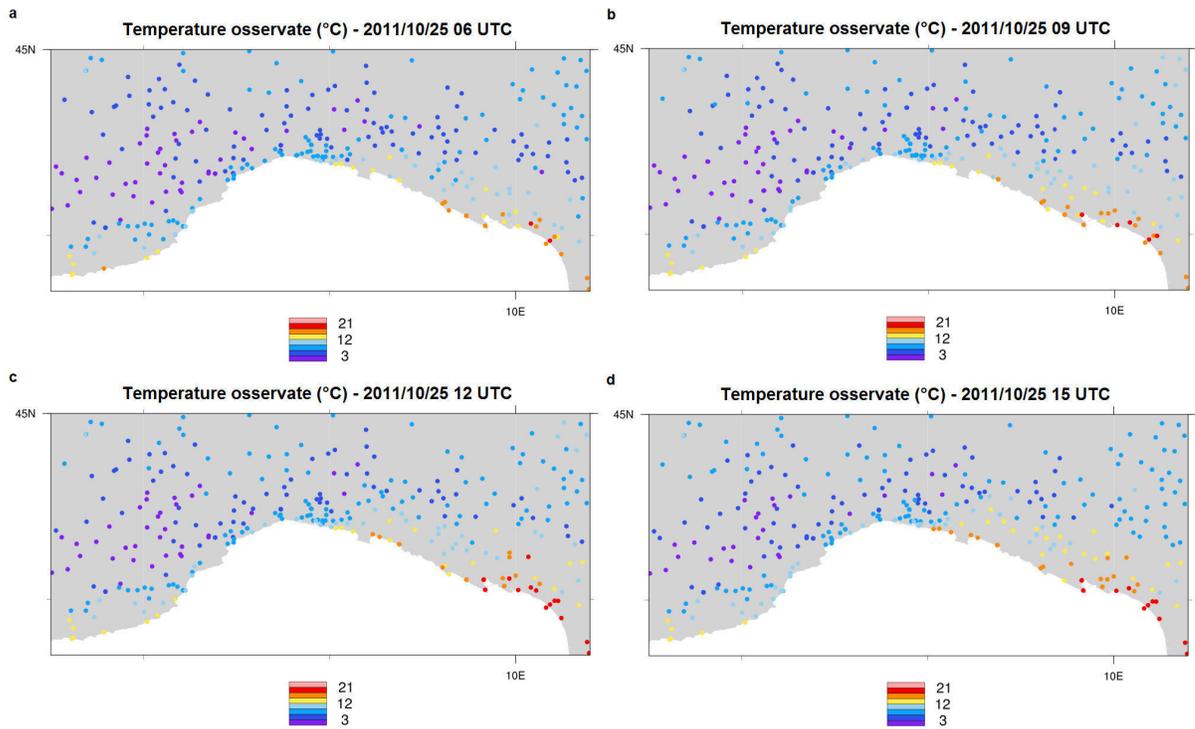


Figura 28: Mappe di evoluzione nel tempo della temperatura misurata al suolo (focus sulla Liguria) riferite alle ore 06 UTC (a), (b) alle ore 09 UTC, (c) alle ore 12 UTC, e (d) alle ore 15 UTC del 25 ottobre 2011 (Fonte: ARPAL).

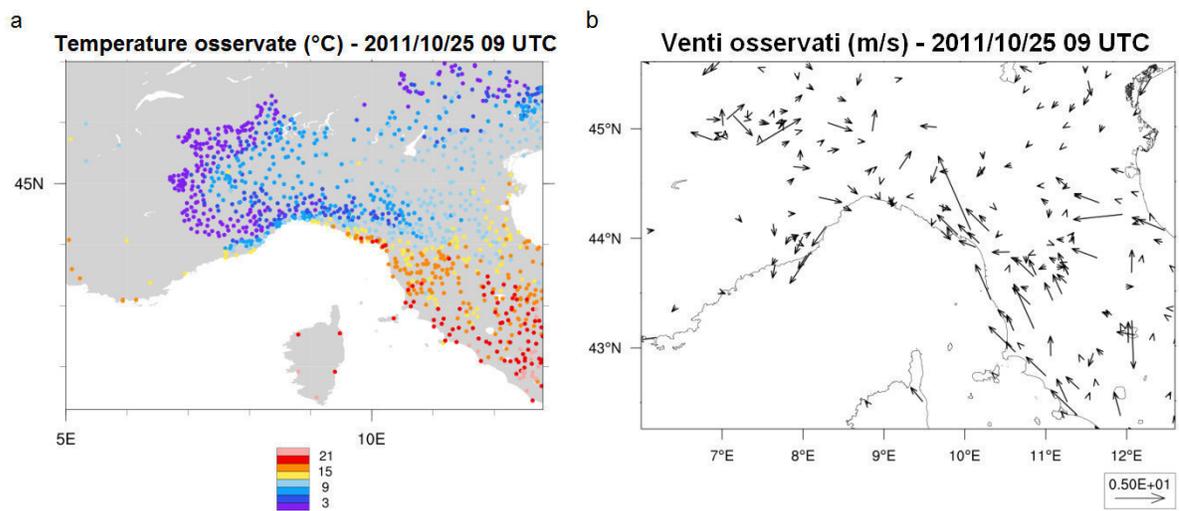


Figura 29: Mappe relative alla temperatura (a) e (b) al campo di vento misurati al suolo riferite alle ore 09 UTC del 25 ottobre 2011 (Fonte: ARPAL).

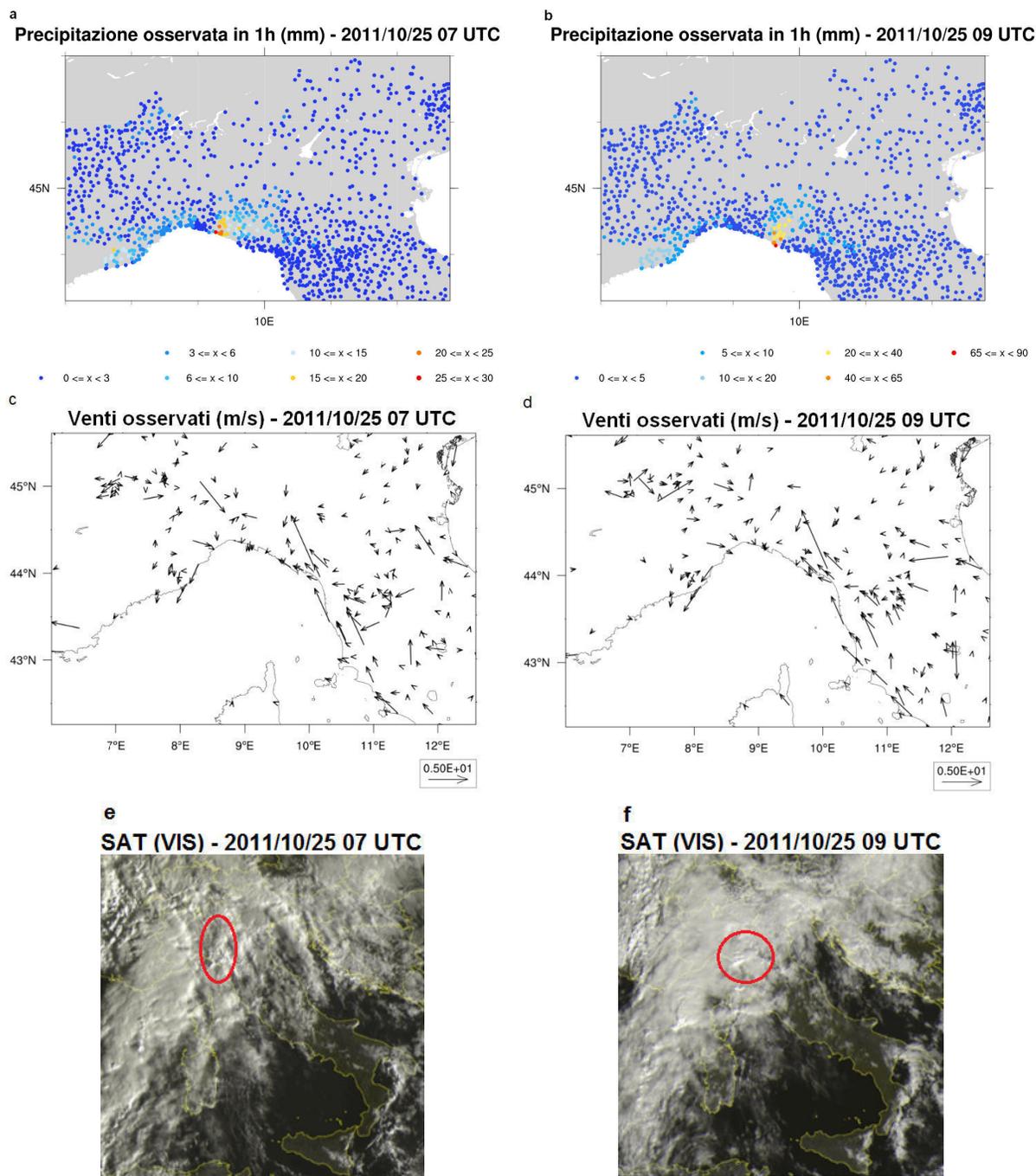


Figura 30: Mappe di evoluzione nel tempo della precipitazione (a-b) e (c-d) del campo di vento osservati al suolo (Fonte: ARPAL), e (e-f) immagini dal satellite MSG nel visibile, riferite alle ore 07 UTC e alle ore 09 UTC del 25 ottobre 2011 (Fonte: www.sat24.com - Eumetsat - Met Office). In evidenza le prime celle convettive in spostamento da ovest verso est.

sulla parte orientale della Liguria l'effetto del flusso caldo e umido da sud-est in contrasto con il flusso settentrionale presente su Genova e sul settore centro-occidentale della regione. È rilevante il gradiente termico presente fra la parte centrale e l'estremo settore orientale della Liguria (compreso fra 9-10 °C). Ulteriore prova ci viene fornita comparando la mappa delle temperature (Fig.29a) e dei venti al suolo (Fig.29b) osservati alle ore 09 UTC (Fig.29a): si nota come esista la linea di convergenza fra i due flussi di origine diversa nei pressi delle Cinque Terre.

Osservando, invece, le mappe delle precipitazioni registrate dai pluviometri posizionati su tutto il nord Italia si evince come, fin dalle prime ore del mattino, sul ponente ligure sussista un debole flusso sud-orientale in grado di produrre precipitazioni moderate (sulle Alpi Occidentali, dagli 800-1000 metri in su, la precipitazione era a carattere nevoso), e come un sistema temporalesco interessi la parte centro-orientale della Liguria (Fig.30a).

Due ore dopo (Fig.30b), si vede come il sistema convettivo si sposti sempre più verso sud-est, iniziando ad abbordare le Cinque Terre, mentre rovesci per lo più moderati interessano la provincia di Imperia. Ciò è osservabile anche se si fa riferimento allo spostamento verso est-sud-est della convergenza dei venti e del flusso umido al suolo, seppur ancora non molto evidente (Fig.30c, Fig.30d). Inoltre le immagini dal satellite mostrano come le prime celle temporalesche si formino davanti alla zona del Tigullio (Fig.30e), mentre le successive celle siano più spostate verso est, cominciando ad interessare la zona delle Cinque Terre e la Val di Vara (Fig.30f).

Nelle due ore successive, il sistema convettivo è rimasto stazionario sul Golfo Ligure interessando la zona delle Cinque Terre con precipitazioni molto intense (Fig.31a e Fig.31b), supportato ed alimentato da una convergenza di venti sud-orientali, mentre più a ovest era presente un flusso settentrionale. Col passare delle ore il sistema convettivo assume ancora più vigore (Fig.31c e Fig.31d). Le immagini satellitari confermano la presenza del sistema convettivo sulla parte più orientale della regione (Fig.31e e Fig.31f).

Nelle ore seguenti, il sistema convettivo insiste praticamente sempre sulle stesse zone, ovvero le Cinque Terre e la Val di Vara, dove vengono registrati i picchi precipitativi massimi (144 mm in un'ora a Brugnato-Borghetto Vara, alle ore 13 UTC, Fig.32b).

Anche successivamente il sistema temporalesco colpisce la stessa zona (Fig.32c e Fig.32d), andando così ad aggravare ulteriormente la situazione idrogeologica della zona.

Si verificano, infatti, l'esondazione del fiume Vara, dei rii e torrenti del versante tirrenico tra Levanto e Vernazza, del fiume Magra e dei suoi affluenti in diversi punti a cui è purtroppo seguita la perdita di ben 13 vite umane.

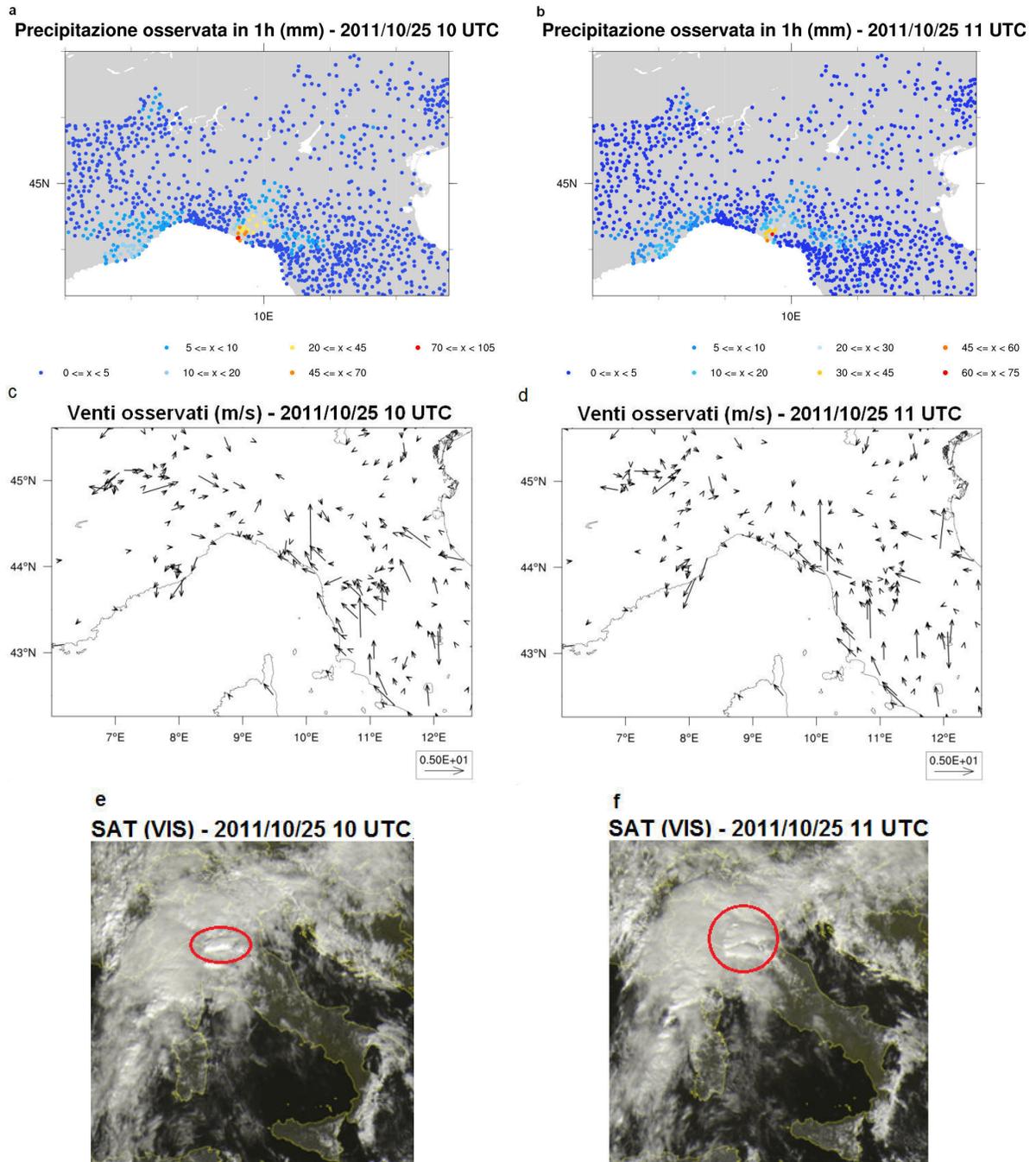


Figura 31: Mappe di evoluzione nel tempo della precipitazione (a-b) e (c-d) del campo di vento osservati al suolo (Fonte: ARPAL), e (e-f) immagini dal satellite MSG nel visibile, riferite alle ore 10 UTC e alle ore 11 UTC del 25 ottobre 2011 (Fonte: www.sat24.com - Eumetsat - Met Office). In evidenza il sistema temporalesco che colpisce le Cinque Terre.

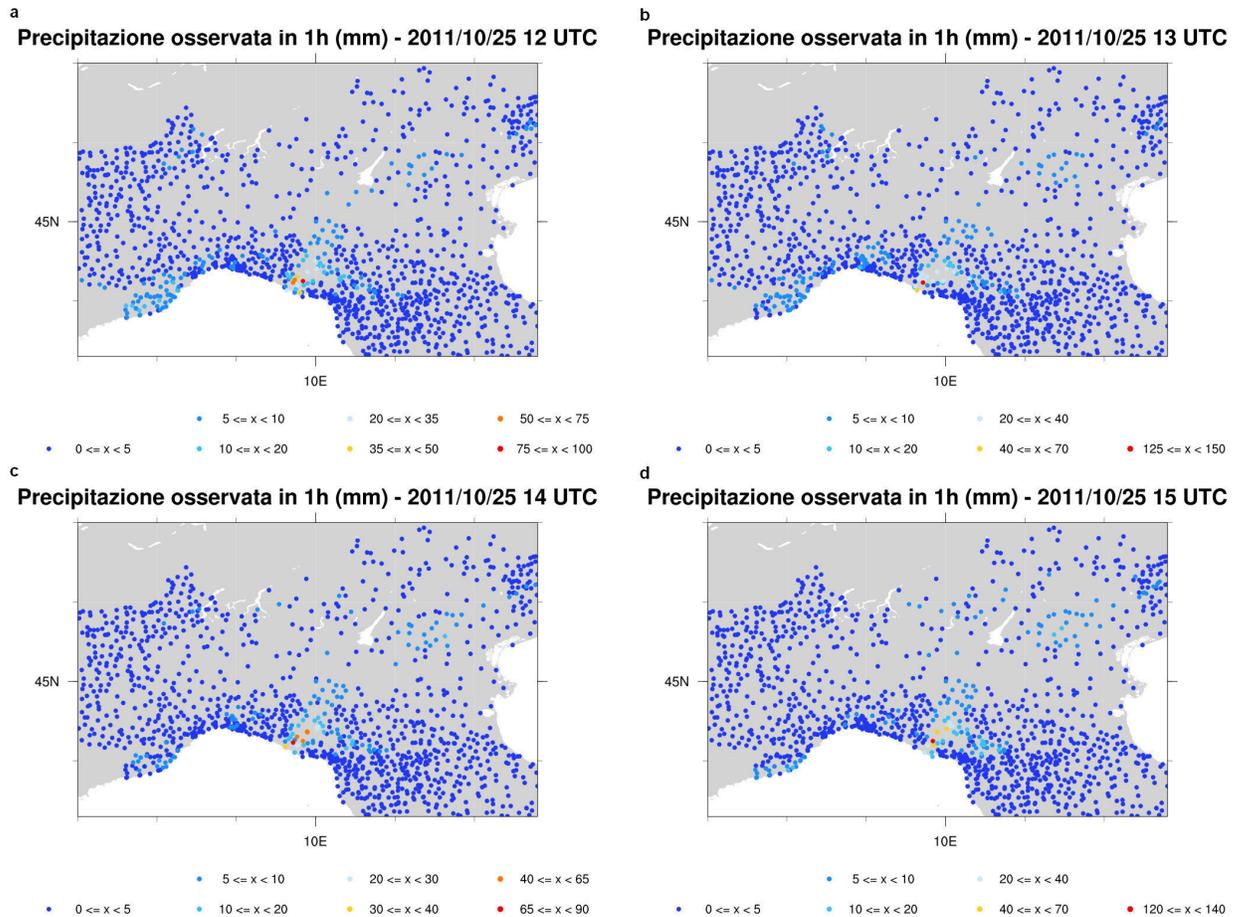


Figura 32: Mappe di evoluzione nel tempo della precipitazione osservata riferite alle ore 12 UTC (a), (b) alle ore 13 UTC, (c) alle ore 14 UTC, e (d) alle ore 15 UTC del 25 ottobre 2011 (Fonte: ARPAL).

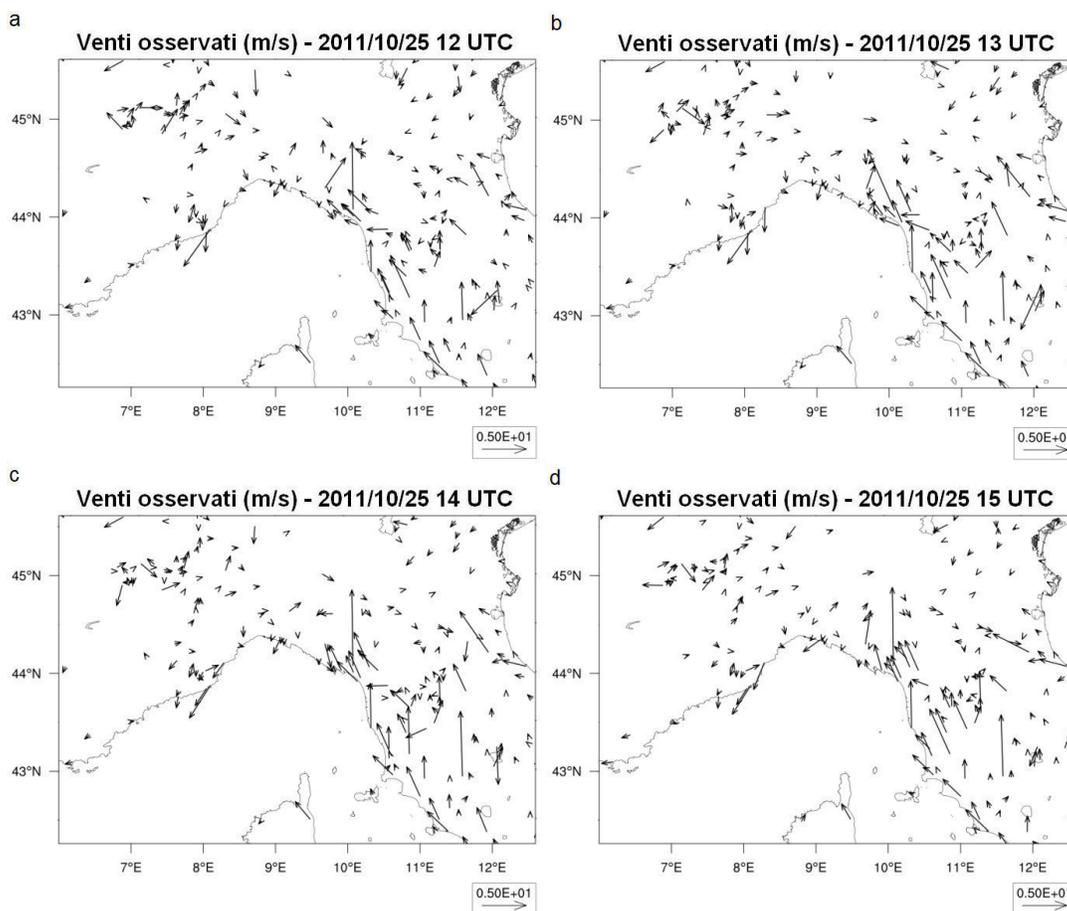


Figura 33: Mappe di evoluzione nel tempo dei venti misurati al suolo riferite alle ore 12 UTC (a), (b) alle ore 13 UTC, (c) alle ore 14 UTC, e (d) alle ore 15 UTC del 25 ottobre 2011 (Fonte: ARPAL).

Gli effetti devastanti delle piene, delle frane e degli smottamenti, sviluppatisi diffusamente sul Levante ligure, hanno determinato importanti danni alle infrastrutture (crollo di ponti, interruzione della viabilità provinciale e comunale, nonché di alcuni tratti autostradali e ferroviari, con temporanea sospensione di servizi essenziali quali acqua, gas e telefonia).

Le mappe del campo dei venti mostrano come la convergenza rimanga alquanto stabile e concentrata nella zona compresa tra la Val di Vara e le Cinque Terre (Fig.33a, Fig.33b, Fig.33c e Fig.33d).

Inoltre, dalle immagini satellitari, si nota come il sistema temporalesco, con la sua caratteristica forma a V, stazioni sulla stessa zona ormai per almeno 5-6 ore (Fig.34a, Fig.34b, Fig.34c e Fig.34d).

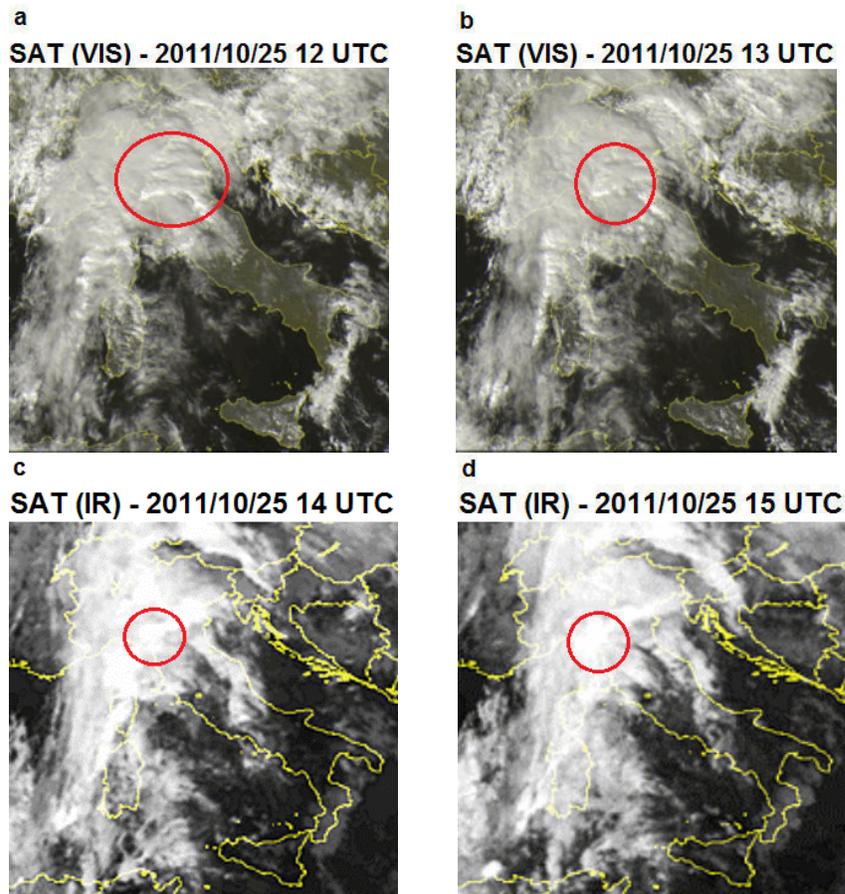


Figura 34: Immagini dal satellite MGS nel visibile riferite alle ore 12 UTC e alle ore 13 UTC (a-b), e (c-d) nell'infrarosso, riferite alle ore 14 UTC e alle ore 15 UTC del 25 ottobre 2011 (Fonte: [www.sat24.com](http://www.sat24.com) - Eumetsat - Met Office). In evidenza il sistema organizzato statico sulle Cinque Terre.

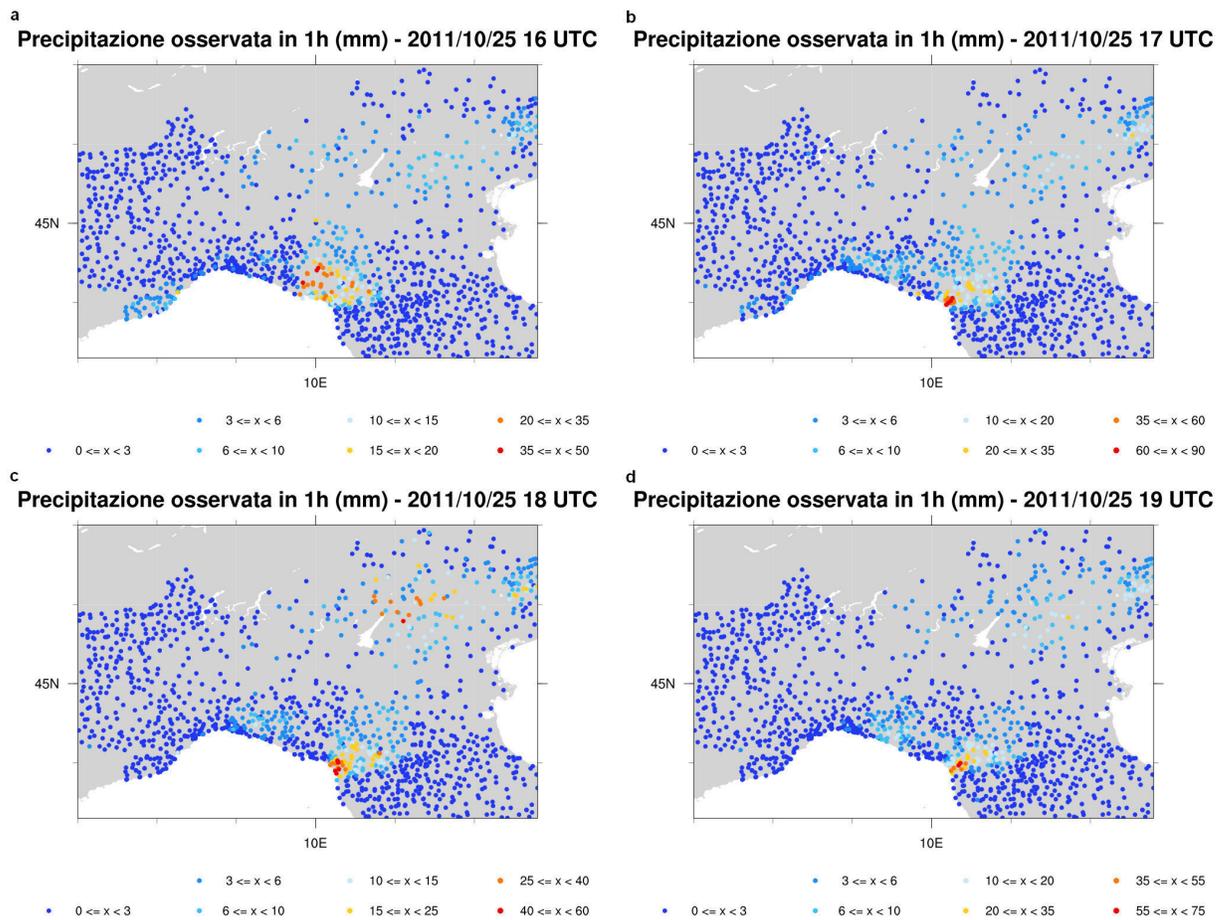


Figura 35: Mappe di evoluzione nel tempo della precipitazione osservata riferite alle ore 16 UTC (a), (b) alle ore 17 UTC, (c) alle ore 18 UTC, e (d) alle ore 19 UTC del 25 ottobre 2011 (Fonte: ARPAL).

Nel tardo pomeriggio, con il traslare del fronte associato alla saccatura verso est, le precipitazioni interessano maggiormente l'area al confine con la Toscana, ovvero l'alta Val di Magra e la Lunigiana (Fig.35a, Fig.35b, Fig.35c e Fig.35d).

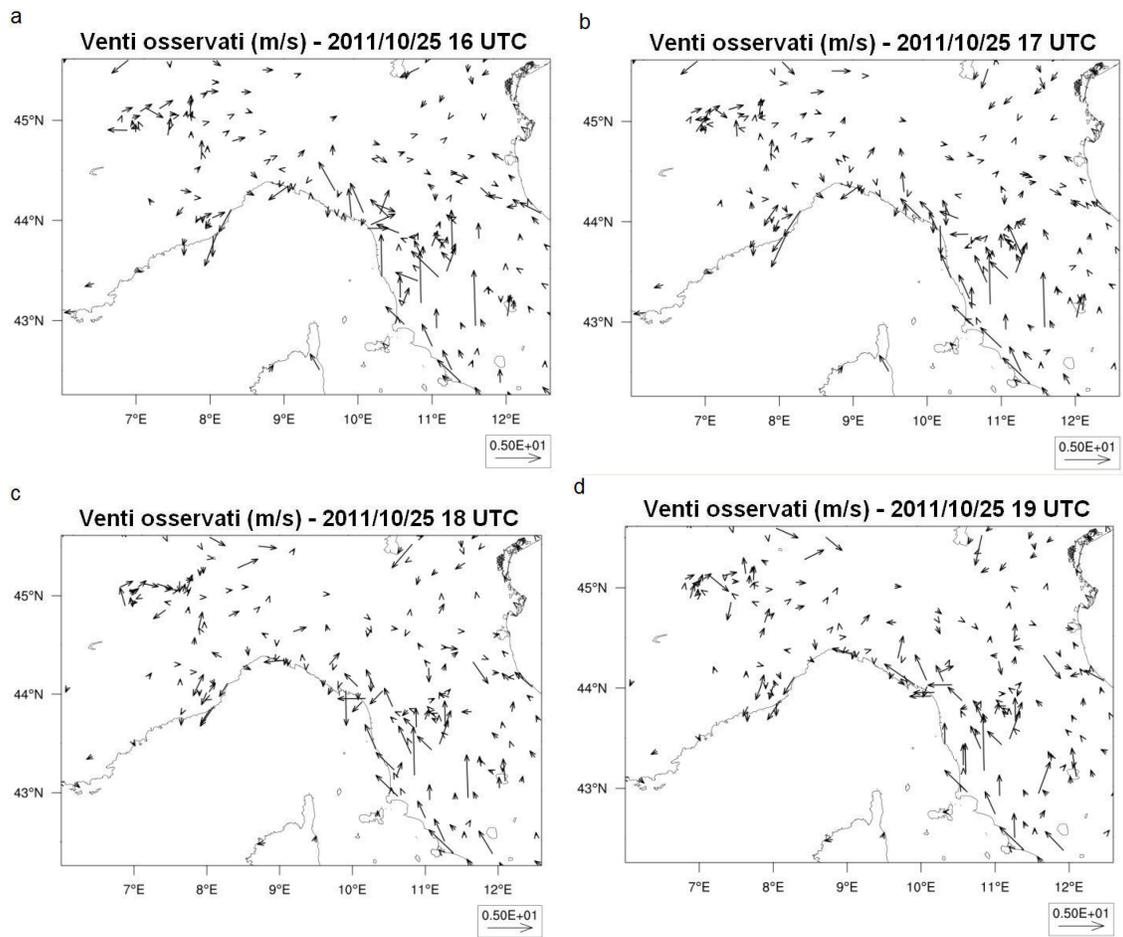


Figura 36: Mappe di evoluzione nel tempo dei venti misurati al suolo riferite alle ore 16 UTC (a), (b) alle ore 17 UTC, (c) alle ore 18 UTC, e (d) alle ore 19 UTC del 25 ottobre 2011 (Fonte: ARPAL).

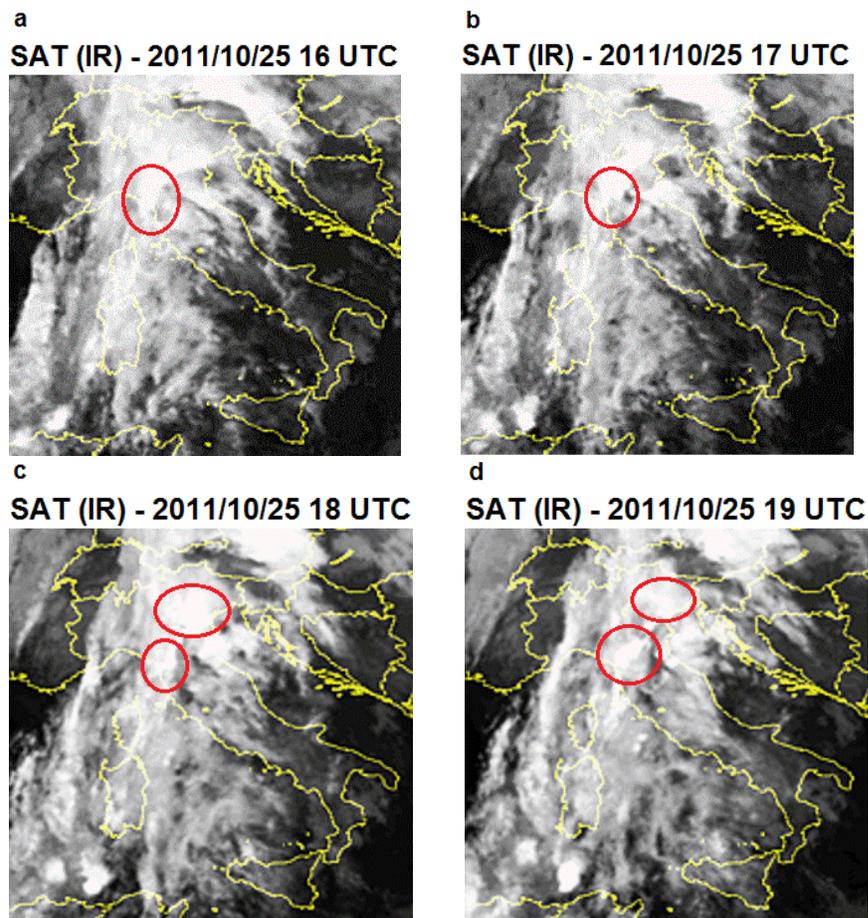


Figura 37: Immagini dal satellite MGS nell'infrarosso riferite alle ore 17 UTC (a), alle ore 18 UTC (b), alle ore 19 UTC (c), e (d) alle ore 20 UTC del 25 ottobre 2011 (Fonte: [www.sat24.com](http://www.sat24.com) - Eumetsat - Met Office). In evidenza le nuove celle temporalesche sull'alta Toscana, sul Veneto, Trentino e Friuli.

Ciò è evidente anche dalle Fig.36a, Fig.36b, Fig.36c e Fig.36d, le quali mostrano il lento spostamento della convergenza verso est, a ridosso dell'alta Toscana, e dalle Fig.37a, Fig.37b in cui si vede il sistema temporalesco organizzato indebolito.

Le immagini satellitari (Fig.37c e Fig.37d) confermano la formazione di nuove celle convettive al confine tra la Liguria e la Toscana (interessando marginalmente anche l'Appennino parmense), in Veneto, in Trentino e nella parte più occidentale del Friuli-Venezia Giulia.

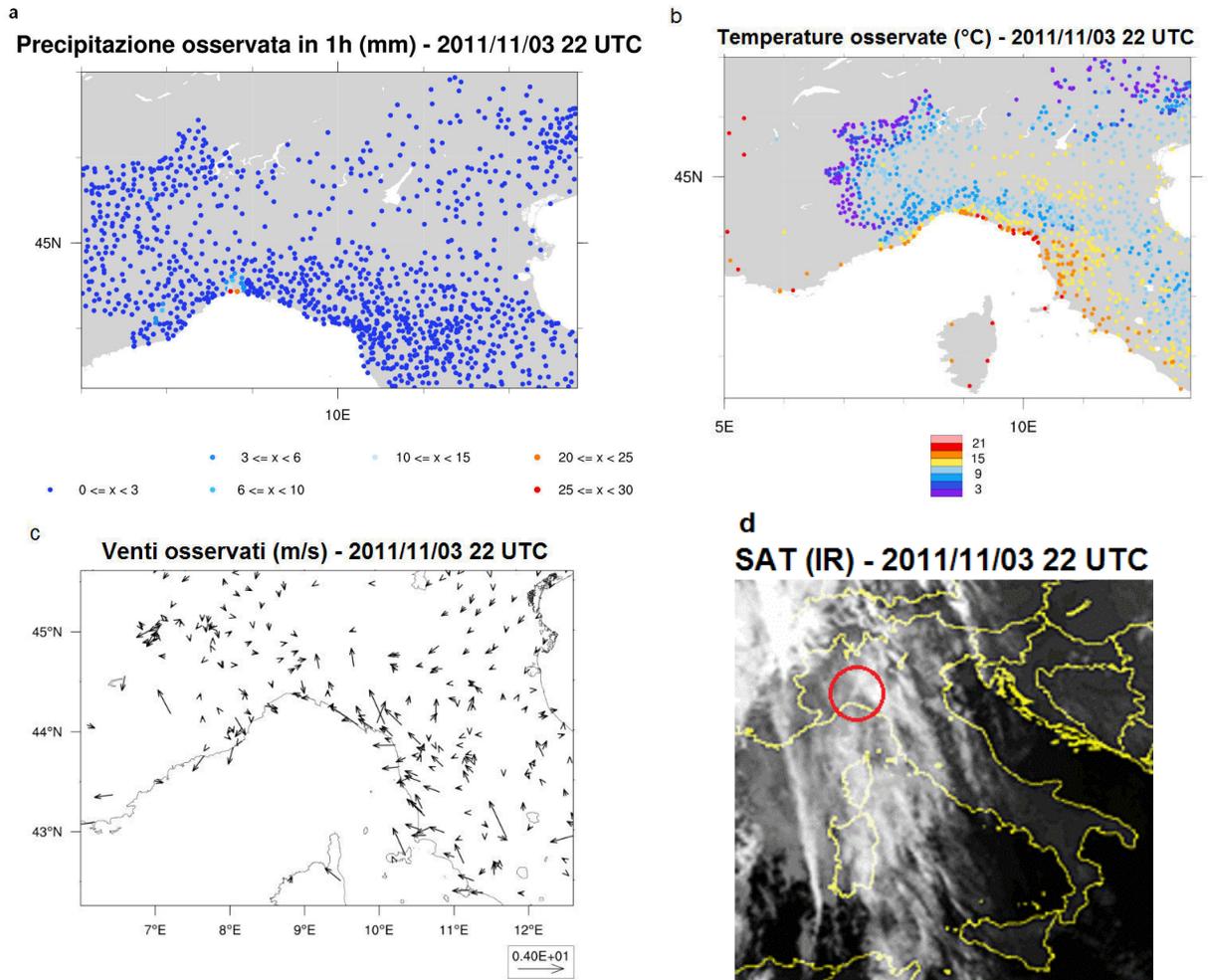


Figura 38: Mappe della precipitazione (a), (b) della temperatura, e (c) del campo di vento osservati al suolo (Fonte: ARPAL), e (d) immagine satellitare MGS nell'infrarosso, riferite alle ore 22 UTC del 3 novembre 2011 (Fonte: [www.sat24.com](http://www.sat24.com) - Eumetsat - Met Office). In evidenza la cella convettiva responsabile delle precipitazioni avutesi nell'area ad ovest di Genova.

### 4.3 Evento di Genova

La sera del 3 novembre, in sede prefrontale, il settore centrale della Liguria e il ponente genovese sono interessati dai primi sistemi temporaleschi (Fig.38a) e, da come si può notare dalla Fig.38b, in queste zone il divario termico rispetto al levante ligure è piuttosto rilevante a causa principalmente dell'effetto del calore latente di evaporazione, sottratto all'atmosfera circostante, dovuto alle correnti di outflow in seno alle celle temporalesche formatesi.

Si nota già un primo abbozzo di convergenza fra il flusso settentrionale in uscita dalle valli savonesi e quello sud-orientale (Fig.38c).

Ulteriore conferma della presenza di una cella temporalesca viene fornita dall'immagine satellitare nel canale infrarosso, relativa alle ore 22 UTC (Fig.38d).

Gli episodi convettivi del 4 novembre sono iniziati, come abbiamo già visto, nelle primissime ore del mattino, quando un sistema temporalesco si è sviluppato in prossimità del Monte di Portofino (Fig.39e e Fig.39f), arrecando però, almeno all'inizio, piogge ancora deboli o al più moderate (Fig.39a e Fig.39b).

Si può notare dal campo di vento la formazione della convergenza ad est di Genova (Fig.39c e Fig.39d).

Il sistema convettivo, col passare delle ore, si sposta leggermente verso ovest, andando a interessare nella mattinata Recco, come si può notare dalle Fig.40a e Fig.40b, in coincidenza con la zona di convergenza che andava sempre di più a formarsi e a svilupparsi sul Golfo Ligure (Fig.40c e Fig.40d).

Le immagini satellitari nell'infrarosso confermano la formazione delle prime celle convettive poco ad ovest di Portofino (Fig.40e e Fig.40f).

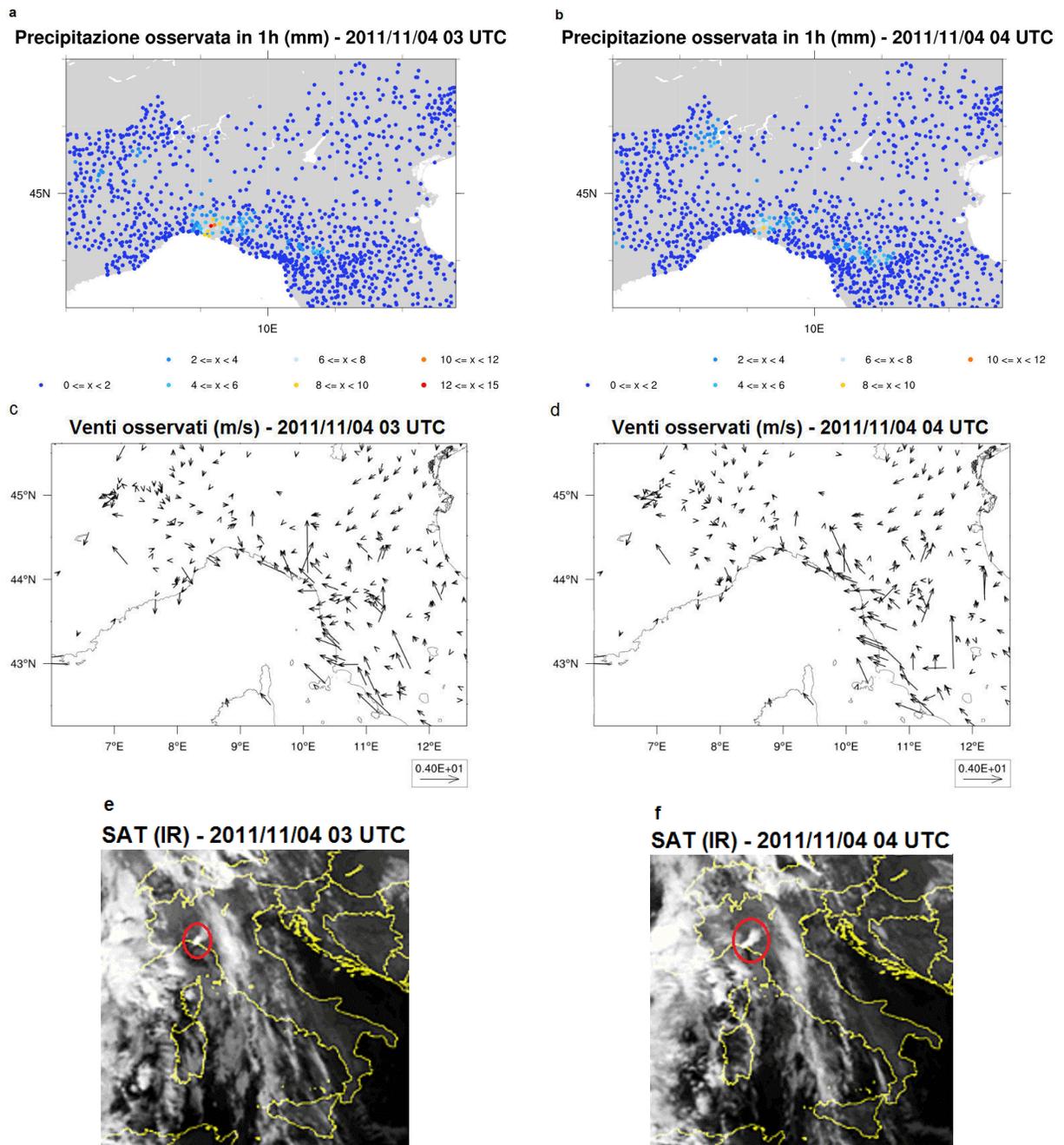


Figura 39: Mappe di evoluzione nel tempo della precipitazione (a-b) e (c-d) del campo di vento osservato al suolo (Fonte: ARPAL), e (e-f) immagini dal satellite MSG nell'infrarosso, riferite alle ore 03 UTC e alle ore 04 UTC del 4 novembre 2011 (Fonte: [www.sat24.com](http://www.sat24.com) - Eumetsat - Met Office). In evidenza la formazione delle prime celle convettive.

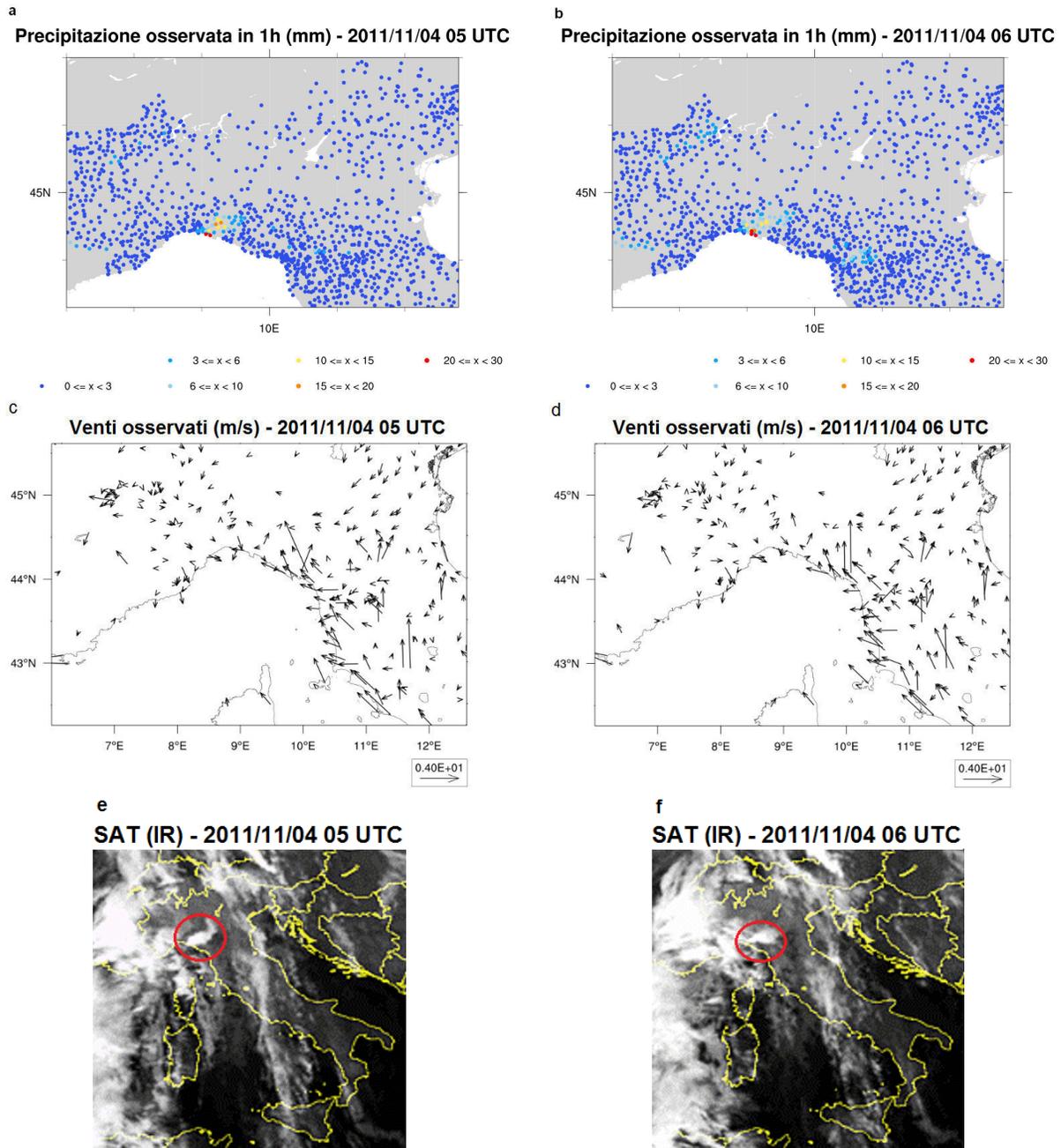


Figura 40: Mappe di evoluzione nel tempo della precipitazione (a-b) e (c-d) del campo di vento osservati al suolo (Fonte: ARPAL), e (e-f) immagini dal satellite MSG nell'infrarosso, riferite alle ore 05 UTC e alle ore 06 UTC del 4 novembre 2011 (Fonte: www.sat24.com - Eumetsat - Met Office). In evidenza lo sviluppo delle prime celle convettive.

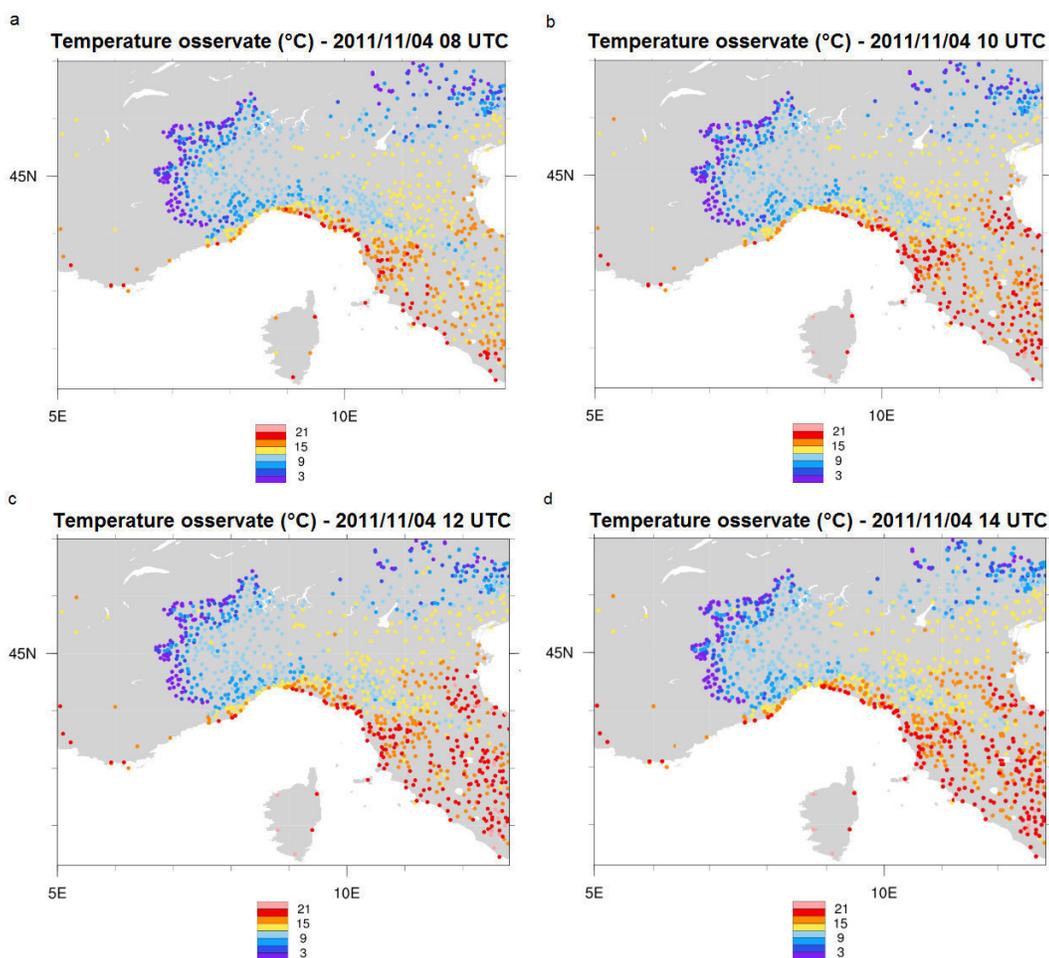


Figura 41: Mappe di evoluzione nel tempo della temperatura misurata al suolo riferite alle ore 08 UTC (a), (b) alle ore 10 UTC, (c) alle ore 12 UTC, e (d) alle ore 14 UTC del 4 novembre 2011 (Fonte: ARPAL).

Ulteriore prova dell'esistenza di una sorta di demarcazione tra il flusso sud-orientale e quello settentrionale, con Genova approssimativamente collocata lungo tale linea, è dato dal campo di temperatura misurata al suolo e della sua evoluzione nel tempo sul nord Italia (Fig.41a, Fig.41b, Fig.41c e Fig.41d). In particolar modo, ciò è visibile effettuando uno zoom sulla Liguria (Fig.42a, Fig.42b, Fig.42c e Fig.42d): si notano, infatti, temperature elevate ad est di Portofino, segno della presenza in queste zone del flusso sud-orientale, e temperature più basse su Genova e ad ovest di essa, in cui persiste il flusso settentrionale al quale si associa, a rinforzare la cold pool, l'evaporazione della precipitazione e il downdraft relativo al sistema convettivo.

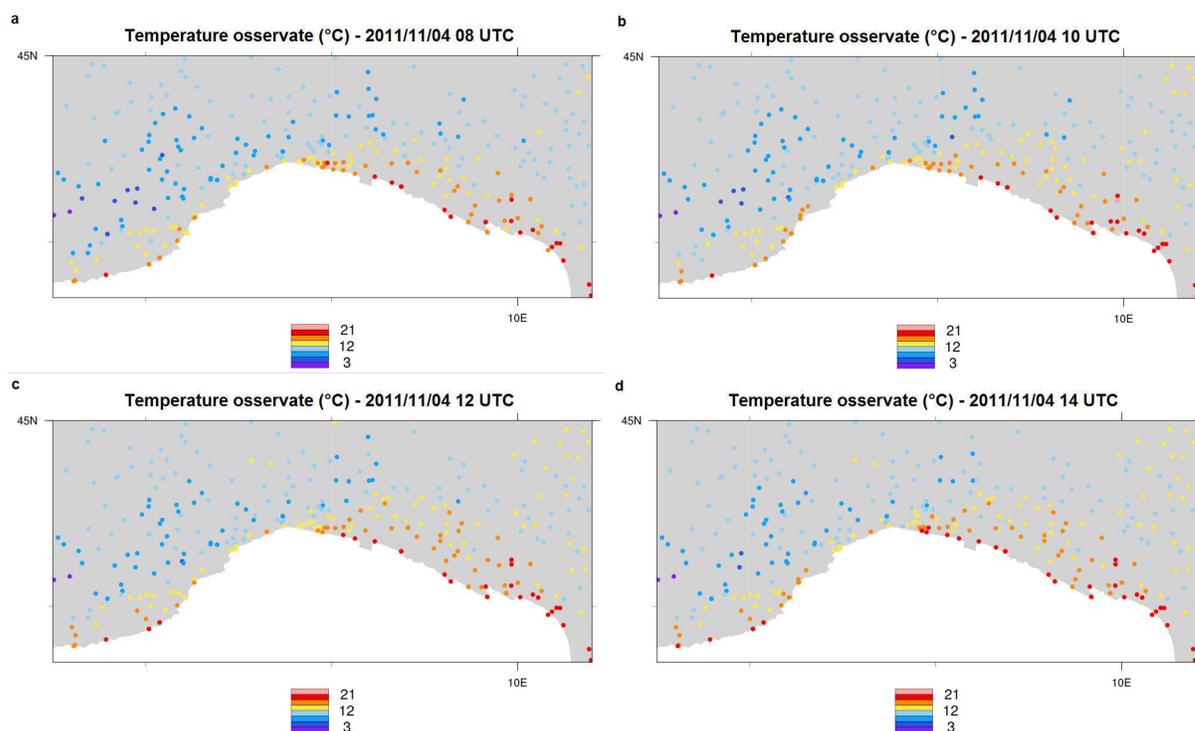


Figura 42: Mappe di evoluzione nel tempo della temperatura misurata al suolo (focus sulla Liguria) riferite alle ore 08 UTC (a), (b) alle ore 10 UTC, (c) alle ore 12 UTC, e (d) alle ore 14 UTC del 4 novembre 2011 (Fonte: ARPAL).

In ogni caso, è evidente come i contrasti termici siano meno intensi rispetto, ad esempio, all'evento delle Cinque Terre.

A metà mattinata, a causa del rinforzo del flusso sud-orientale nei bassi strati (Fig.43c e Fig.43d), si nota come la convergenza, non ancora del tutto sviluppata, trasli leggermente in direzione occidentale, dove poi rimarrà più o meno stazionaria per le 4 ore successive.

Infatti si vede dalle Fig.43a e Fig.43b come i massimi precipitativi, nel giro di un'ora, si spostino verso ovest, verso cioè la parte orientale del capoluogo ligure.

Le immagini satellitari mostrano lo stesso tipo di scenario, ovvero lo spostarsi verso ovest del sistema convettivo (Fig.43e e Fig.43f).

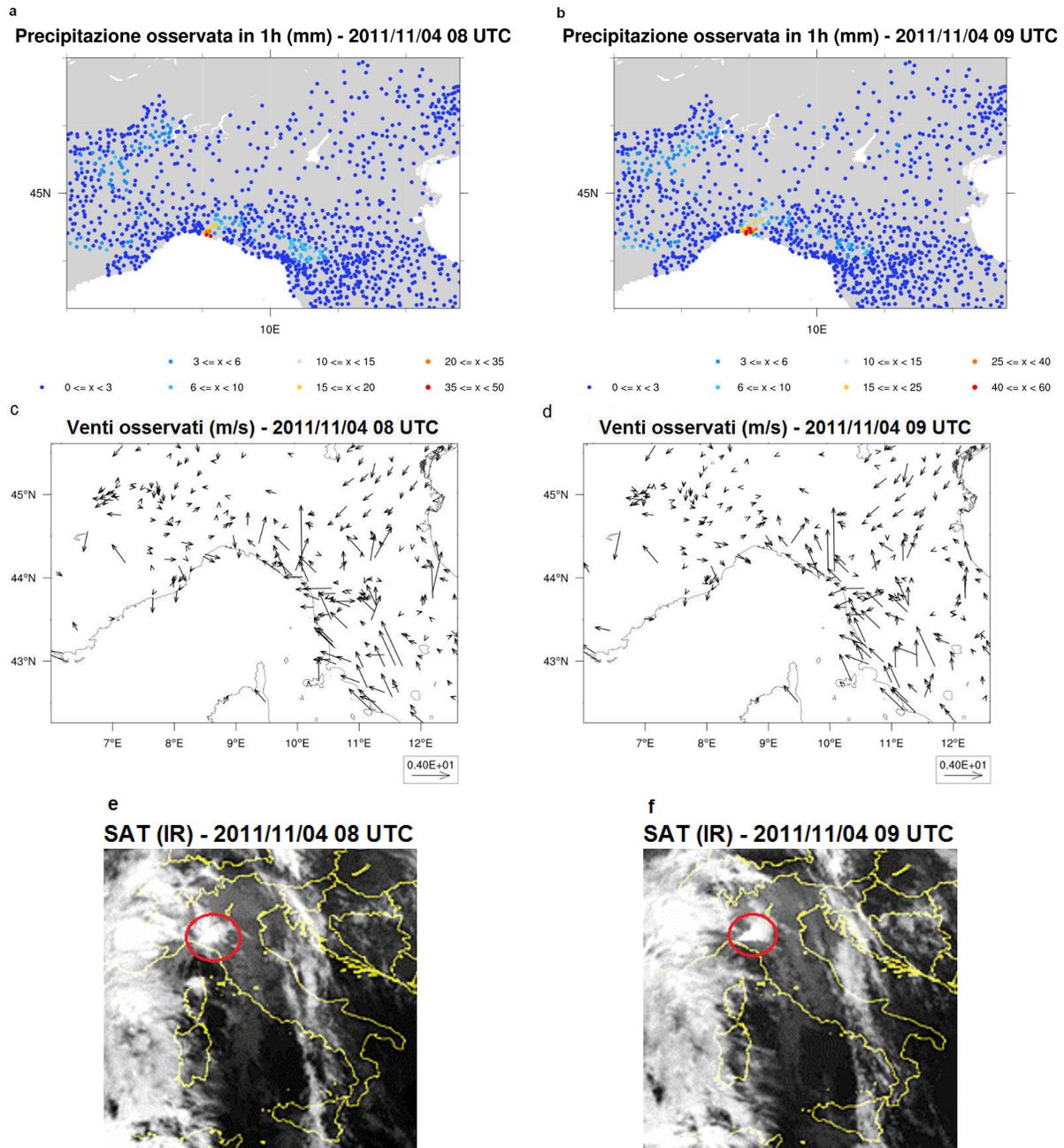


Figura 43: Mappe di evoluzione nel tempo della precipitazione (a-b) e (c-d) del campo di vento osservati al suolo (Fonte: ARPAL), e (e-f) immagini dal satellite MSG nell'infrarosso, riferite alle ore 08 UTC e alle ore 09 UTC del 4 novembre 2011 (Fonte: [www.sat24.com](http://www.sat24.com) - Eumetsat - Met Office). In evidenza il sistema temporalesco in lento spostamento verso ovest.

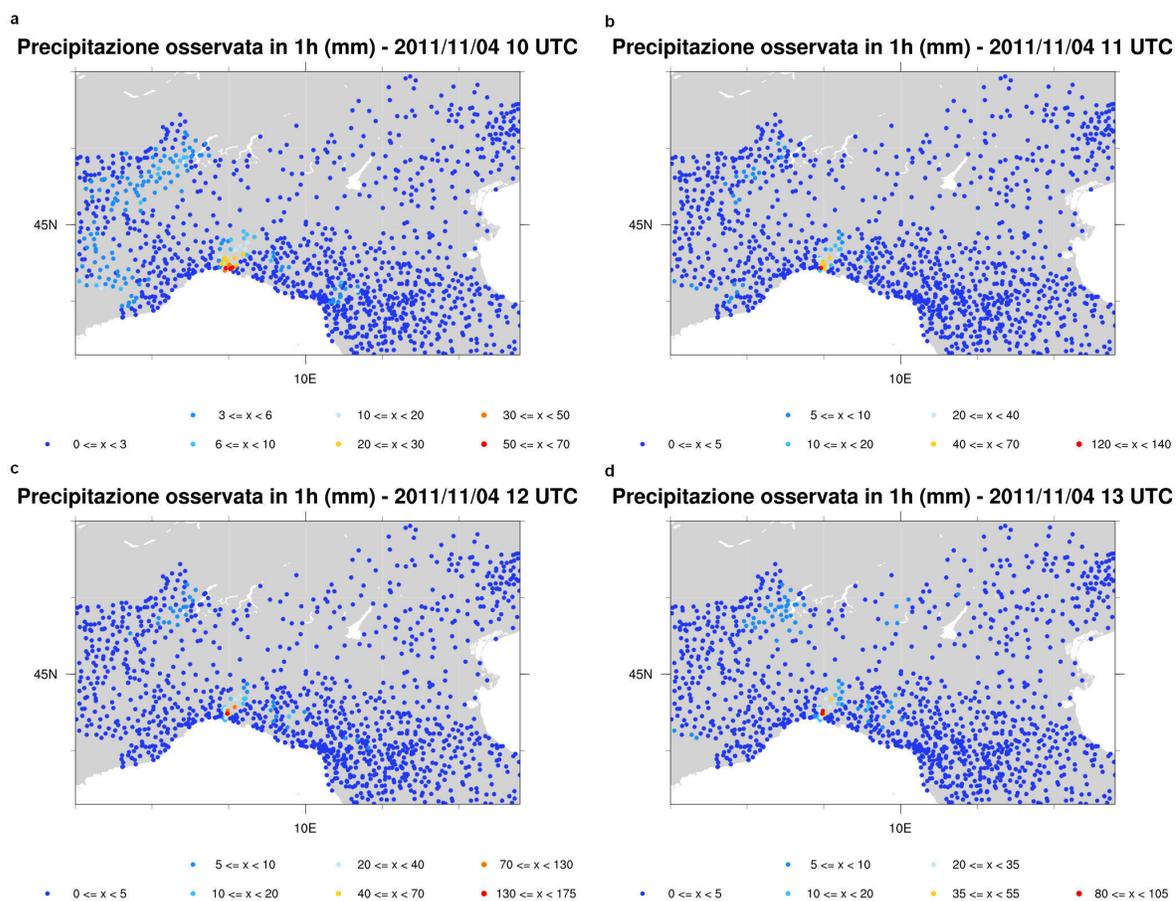


Figura 44: Mappe di evoluzione nel tempo della precipitazione osservata riferite alle ore 10 UTC (a), (b) alle ore 11 UTC, (c) alle ore 12 UTC, e (d) alle ore 13 UTC del 4 novembre 2011 (Fonte: ARPAL).

Focalizzando l'attenzione sul sistema convettivo alla mesoscala che ha contribuito all'esonazione del rio Fereggiano, allo straripamento di alcuni tratti dei torrenti Bisagno e Sturla e alla perdita di sei vite umane, risulta evidente, dalle mappe di evoluzione delle precipitazioni, la portata e la straordinarietà dell'evento: per diverse ore la stessa zona viene interessata da più celle temporalesche formatesi davanti al golfo di Genova (Fig.44a, Fig.44b e Fig.44d) e il massimo precipitativo orario (168 mm) viene raggiunto alle ore 12 UTC e segnalato dalla stazione meteo di Vicomorasso, comune di Sant'Olcese (Fig.44c).

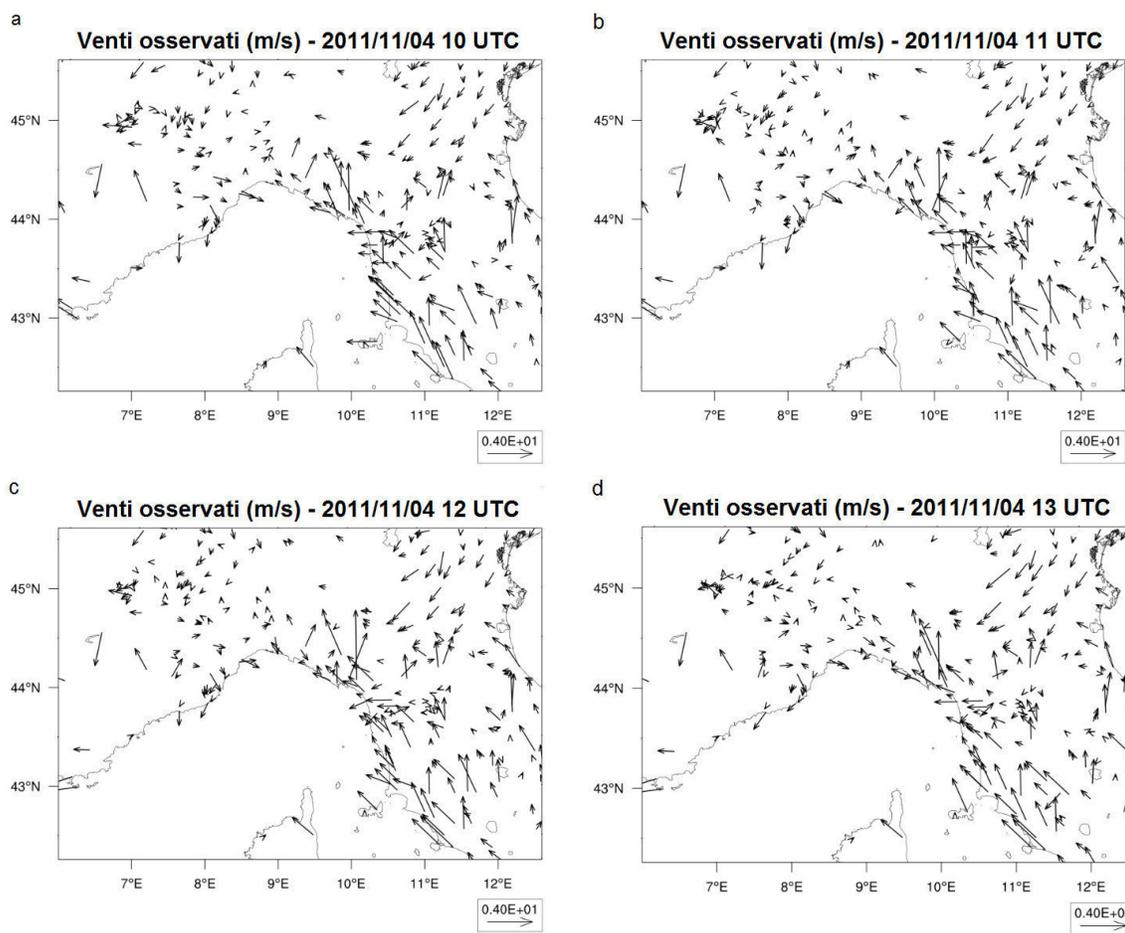


Figura 45: Mappe di evoluzione nel tempo dei venti misurati al suolo riferite alle ore 10 UTC (a), (b) alle ore 11 UTC, (c) alle ore 12 UTC, e (d) alle ore 13 UTC del 4 novembre 2011 (Fonte: ARPAL).

Ulteriori riscontri giungono dalle immagini satellitari, da cui si nota il sistema convettivo organizzato statico davanti a Genova (Fig.46a, Fig.46b, Fig.46c e Fig.46d). Situazione confermata anche dalle mappe del campo dei venti misurati al suolo nello stesso intervallo di tempo: si nota molto bene la convergenza che rimane piuttosto stabile su Genova, fattore importante per la nascita, sviluppo e staticità del sistema temporalesco.

In particolare si nota come alle ore 10 UTC (Fig.45a) il vento da sud-est sul capoluogo sia ancora abbastanza intenso mentre, col passare delle ore, diminuisca d'intensità, e come poi vada in convergenza con i venti provenienti da nord-ovest (outflow) in uscita dalle valli più interne (Fig.45b, Fig.45c e Fig.45d). Da queste mappe si nota come la convergenza dei due flussi opposti non sia stata così forte e duratura rispetto, ad esempio, al caso delle Cinque Terre, anche se è ipotizzabile che sia stata maggiormente riscontrabile sul mare.

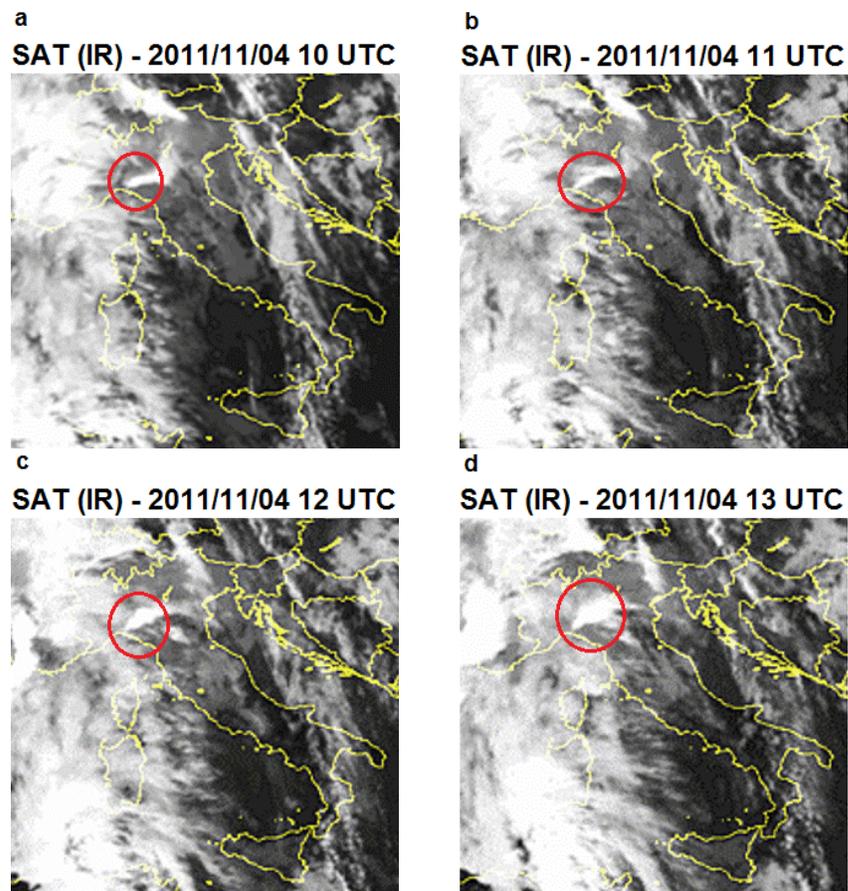


Figura 46: Immagini dal satellite MGS nell'infrarosso riferite alle ore 10 UTC (a), (b) alle ore 11 UTC, (c) alle ore 12 UTC, e (d) alle ore 13 UTC del 4 novembre 2011 (Fonte: [www.sat24.com](http://www.sat24.com) - Eumetsat - Met Office). In evidenza il sistema organizzato statico sul capoluogo ligure.

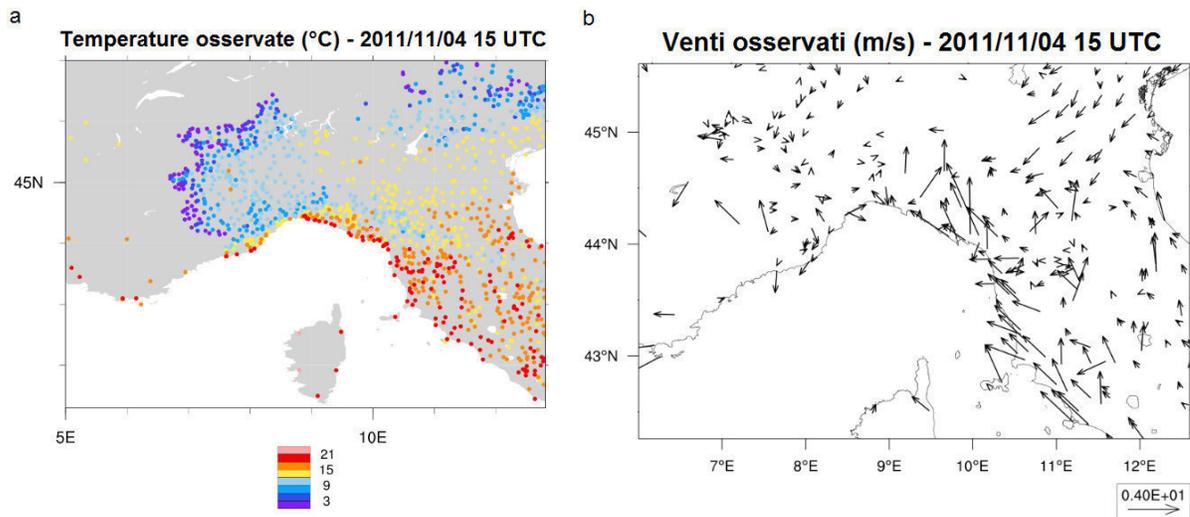


Figura 47: Mappe relative alla temperatura (a) e (b) al campo di vento osservati al suolo (b), riferite alle ore 15 UTC del 4 novembre 2011 (Fonte: ARPAL).

Successivamente, in particolare nel primo pomeriggio, si vede come il sistema convettivo si indebolisca e la zona di convergenza, nel frattempo, inizi a traslare in direzione occidentale: su Genova, in questa fase, il flusso sud-orientale ha preso il sopravvento su quello settentrionale (Fig.47b), facendo anche risalire lentamente le temperature (Fig.47a).

Nelle prime ore del pomeriggio, infatti, la zona di convergenza tra il flusso di aria calda e umida meridionale (rafforzatosi in queste ore) e quello più freddo e secco proveniente da nord si sposta lentamente in direzione occidentale (Fig.49a, Fig.49b, Fig.49c e Fig.49d) e con essa anche le precipitazioni più intense che, nel frattempo, non interessano più la città di Genova (Fig.48a, Fig.48b e Fig.48c).

La zona più colpita, dove viene segnalata la cumulata massima oraria di 121 mm, alle ore 16 UTC, è quella di Campo Ligure, situata a circa 40 km ad ovest del capoluogo ligure (Fig.48d).

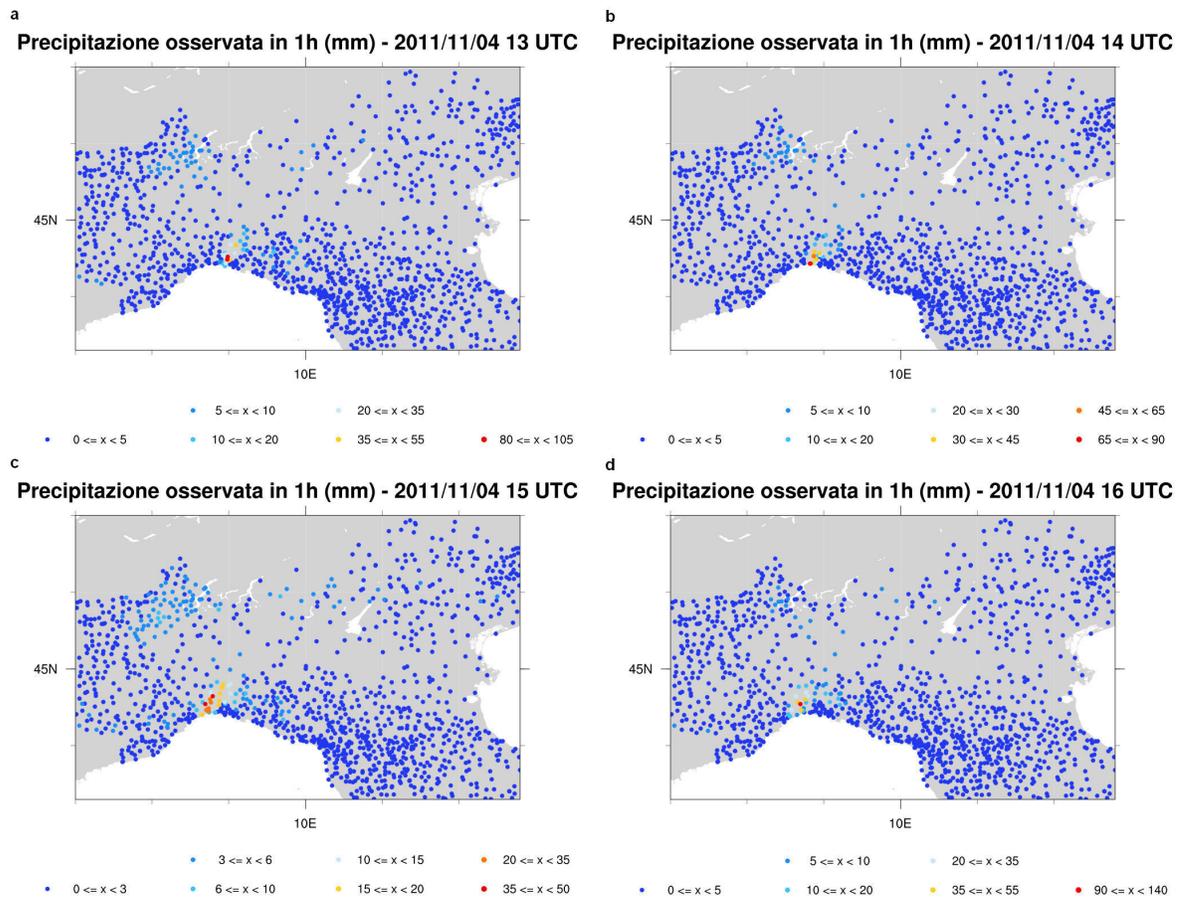


Figura 48: Mappe di evoluzione nel tempo della precipitazione osservata riferite alle ore 13 UTC (a), (b) alle ore 14 UTC, (c) alle ore 15 UTC, e (d) alle ore 16 UTC del 4 novembre 2011 (Fonte: ARPAL).

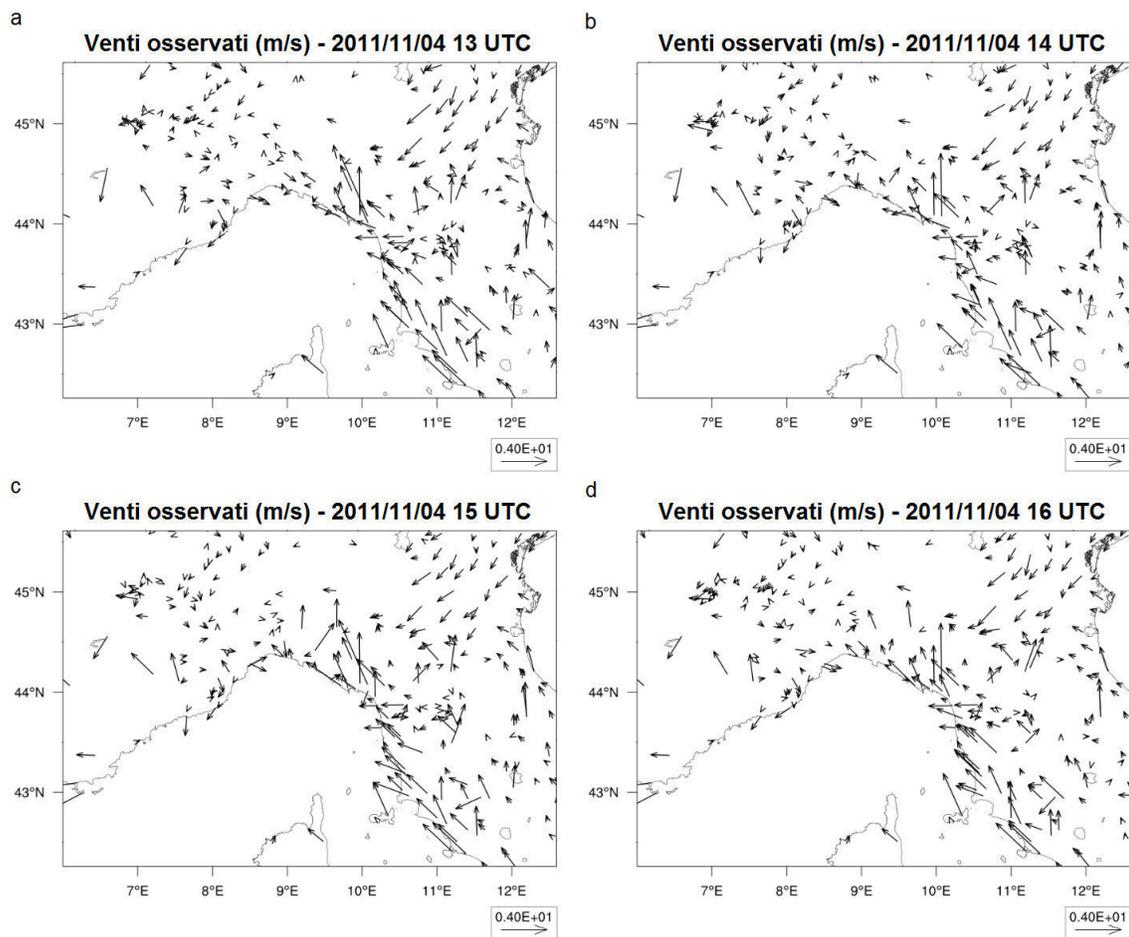


Figura 49: Mappe di evoluzione nel tempo del campo di vento osservato, riferite alle ore 13 UTC (a), (b) alle ore 14 UTC, (c) alle ore 15 UTC, e (d) alle ore 16 UTC del 4 novembre 2011 (Fonte: ARPAL).

Dal satellite, inoltre, risulta evidente come il sistema convettivo sia in fase di esaurimento (Fig.50a e Fig.50b), mentre nuove celle convettive andavano formandosi al centro della regione (Fig.50c e Fig.50d).

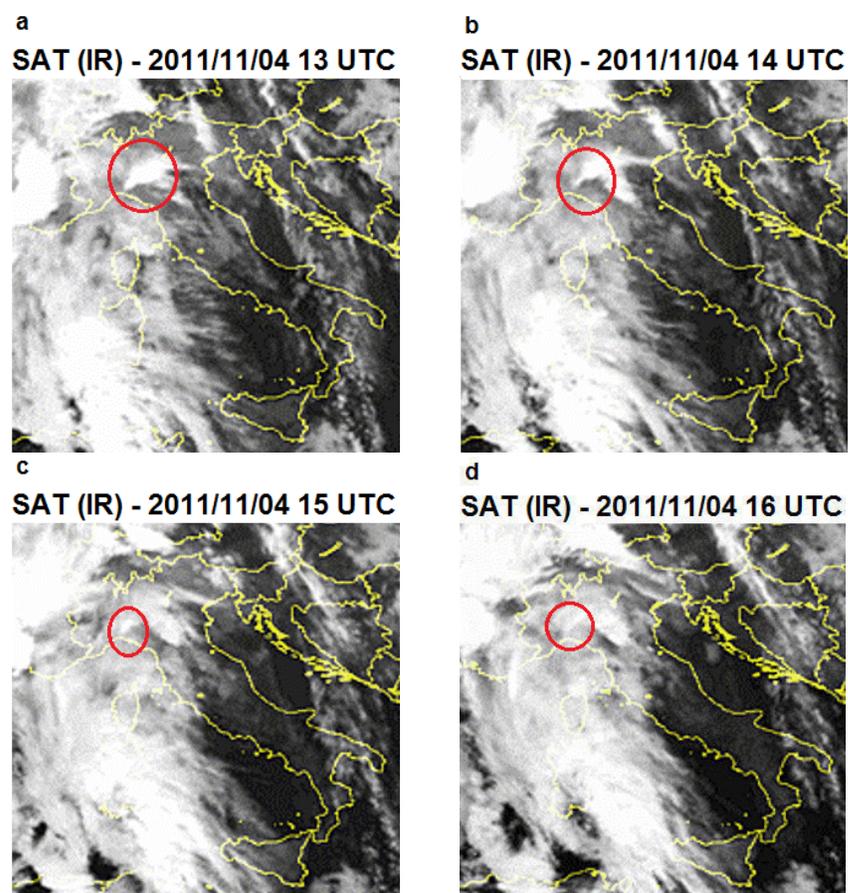


Figura 50: Immagini dal satellite MGS nell'infrarosso riferite alle ore 13 UTC (a), (b) alle ore 14 UTC, (c) alle ore 15 UTC, e (d) alle ore 16 UTC del 4 novembre 2011 (Fonte: [www.sat24.com](http://www.sat24.com) - Eumetsat - Met Office). In evidenza il sistema organizzato ormai in via di esaurimento e la formazione di altre celle convettive più a ovest rispetto al capoluogo ligure.

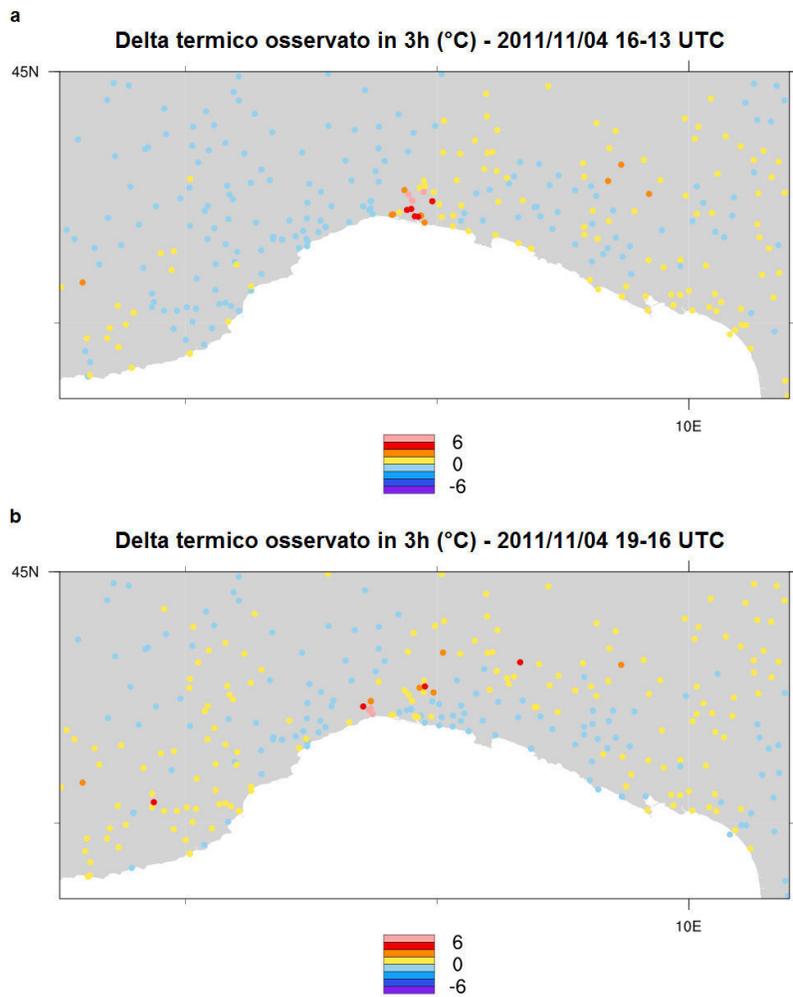


Figura 51: Mappe di evoluzione nel tempo del delta termico osservato in Liguria in 3h dalle 16 UTC alle 13 UTC (a), e (b) dalle 19 UTC alle 16 UTC del 4 novembre 2011 (Fonte: ARPAL).

Infine si sono voluti analizzare, attraverso i dati di temperatura misurati, gli effetti al suolo del moto verso ovest, nel corso del pomeriggio, della linea di convergenza tra il flusso di aria calda e umida meridionale e quello più freddo e secco proveniente da nord.

La Fig.51a mostra i valori del delta termico  $\Delta T_1$  registrato, per ogni stazione al suolo, dalle 16 UTC alle 13 UTC durante la fase iniziale dello spostamento delle celle convettive, della convergenza e, di conseguenza del flusso caldo-umido verso ovest.

$$\Delta T_1 = T_{16} - T_{13}$$

dove  $T_{16}$  e  $T_{13}$  sono le temperature osservate da ogni stazione meteo, rispettivamente alle ore 16 UTC e alle ore 13 UTC.

Osservando la mappa si notano valori positivi di  $\Delta T_1$  (tre dei quali superiori ai 6 °C) concentrati in particolare sul capoluogo ligure .

La Fig.51b mostra, invece, il delta termico  $\Delta T_2$  riportato da ogni stazione al suolo, dalle 19 UTC alle 16 UTC.

$$\Delta T_2 = T_{19} - T_{16}$$

dove  $T_{19}$  e  $T_{16}$  sono le temperature osservate da tutte le stazioni meteo liguri, rispettivamente alle ore 19 UTC e alle ore 16 UTC.

Si nota come i valori positivi di  $\Delta T_2$  (tre dei quali superiori ai 6 °C) si distribuiscano maggiormente sul settore centrale della regione e in misura minore nell'entroterra di Genova. Risulta, quindi, evidente come il flusso di aria calda e umida proveniente da sud-est avanzando verso ovest col passare delle ore, induca un aumento dei valori di temperatura prima su Genova (dalle 13 UTC alle 16 UTC) e poi maggiormente verso il centro della Liguria (dalle 16 UTC alle 19 UTC).

## 5 Analisi modellistica dei due eventi alluvionali

Negli ultimi anni, il problema della previsione del quantitativo di precipitazione (*Quantitative Precipitation Forecasts*, QPF) in caso di eventi convettivi molto intensi è stato affrontato applicando e testando i modelli meteorologici non idrostatici ad alta risoluzione, con passo di griglia di qualche chilometro (tra 1 e 3 km all'incirca) (Davolio et al., 2006; Davolio et al., 2007). Sebbene a tali risoluzione l'approccio risulta essere ancora principalmente di tipo sperimentale, anche a causa dei limiti imposti dal calcolo e dall'assimilazione dei dati, i primi risultati appaiono davvero molto incoraggianti. La capacità di riprodurre i processi a piccola scala (ad esempio la forzatura orografica e la microfisica) e di risolvere con discreta approssimazione le dinamiche della convezione profonda (CRM: *Convection Resolving Model*) ha acconsentito di migliorare la simulazione, la previsione, la struttura e l'evoluzione dei sistemi convettivi. Dall'altra parte, sebbene una risoluzione orizzontale di qualche chilometro venga considerata sufficiente a simulare con buoni risultati le dinamiche a larga scala dei sistemi convettivi organizzati, come gli MCS o le squall lines (Weisman et al., 1997), essa rimane in ogni caso largamente inadeguata per prevedere accuratamente i processi turbolenti e microfisici della convezione profonda (James et al., 2002; Bryan et al., 2003), i quali possono avere un forte impatto sull'intensità e distribuzione della precipitazione, e sul movimento del sistema stesso.

Inoltre, la bassa predicibilità associata alla precipitazione di tipo convettivo pone un limite all'applicabilità della previsione ad alta risoluzione e solleva importanti questioni sull'assimilazione dati e le condizioni iniziali del modello (Walser et al., 2004).

Tra gli obiettivi di questa tesi vi è il confronto dei dati osservati e precedente analizzati con gli output dei modelli, concentrandomi particolarmente sulla precipitazione e sulla dinamica dei sistemi convettivi e dell' "ambiente" a mesoscala in cui si sono sviluppati.

Inoltre, ai fini di una più accurata valutazione delle prestazioni dei modelli, si è voluto stimare la sensibilità della quantità di precipitazione prevista al variare della risoluzione orizzontale, delle condizioni iniziali e al contorno dei due modelli globali (NOAA/GFS e ECMWF/IFS). Gli esperimenti utilizzati in questa tesi sono:

1. BOLAM a 10 km di risoluzione orizzontale inizializzato su dati delle analisi (e successive previsioni come condizioni al contorno) NOAA e ECMWF;
2. MOLOCH, inizializzato su dati delle analisi NOAA, a 3 km, a 2 km, a 1.5 km e a 1 km di passo di griglia.

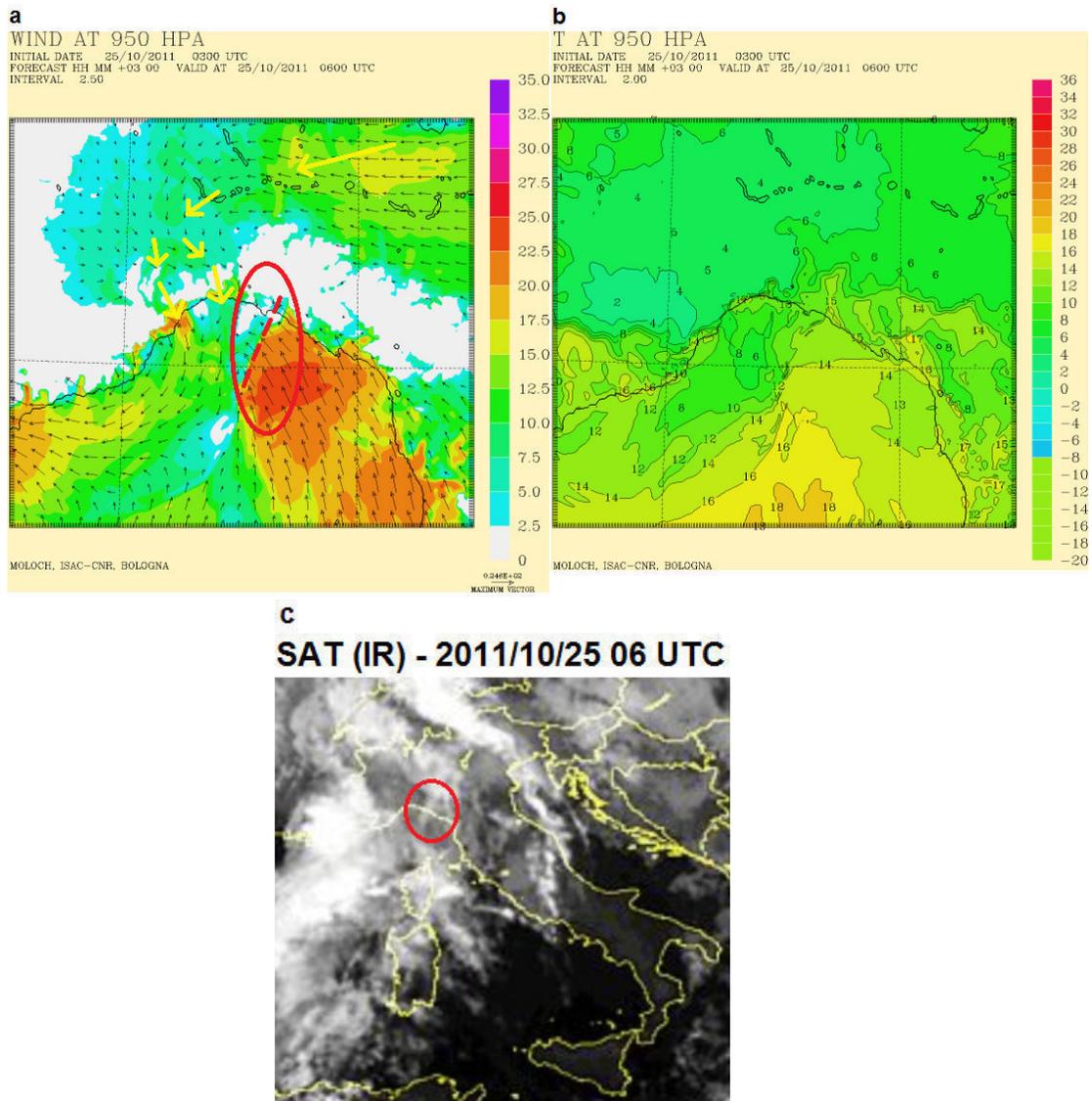


Figura 52: Mappe di previsione del modello MOLOCH inizializzato alle ore 03 UTC del 25 ottobre 2011 (previsione a +3h) con risoluzione orizzontale di 1 km relative al campo di venti (a), (b) alla temperatura, previsti all'altezza geopotenziale di 950 hPa, e (c) immagine dal satellite MGS nell'infrarosso riferita alle ore 06 UTC del 25 ottobre (Fonte: [www.sat24.com](http://www.sat24.com) - Eumetsat - Met Office). In evidenza la zona di convergenza fra i due flussi aventi caratteristiche e provenienza opposti e la formazione delle prime celle convettive.

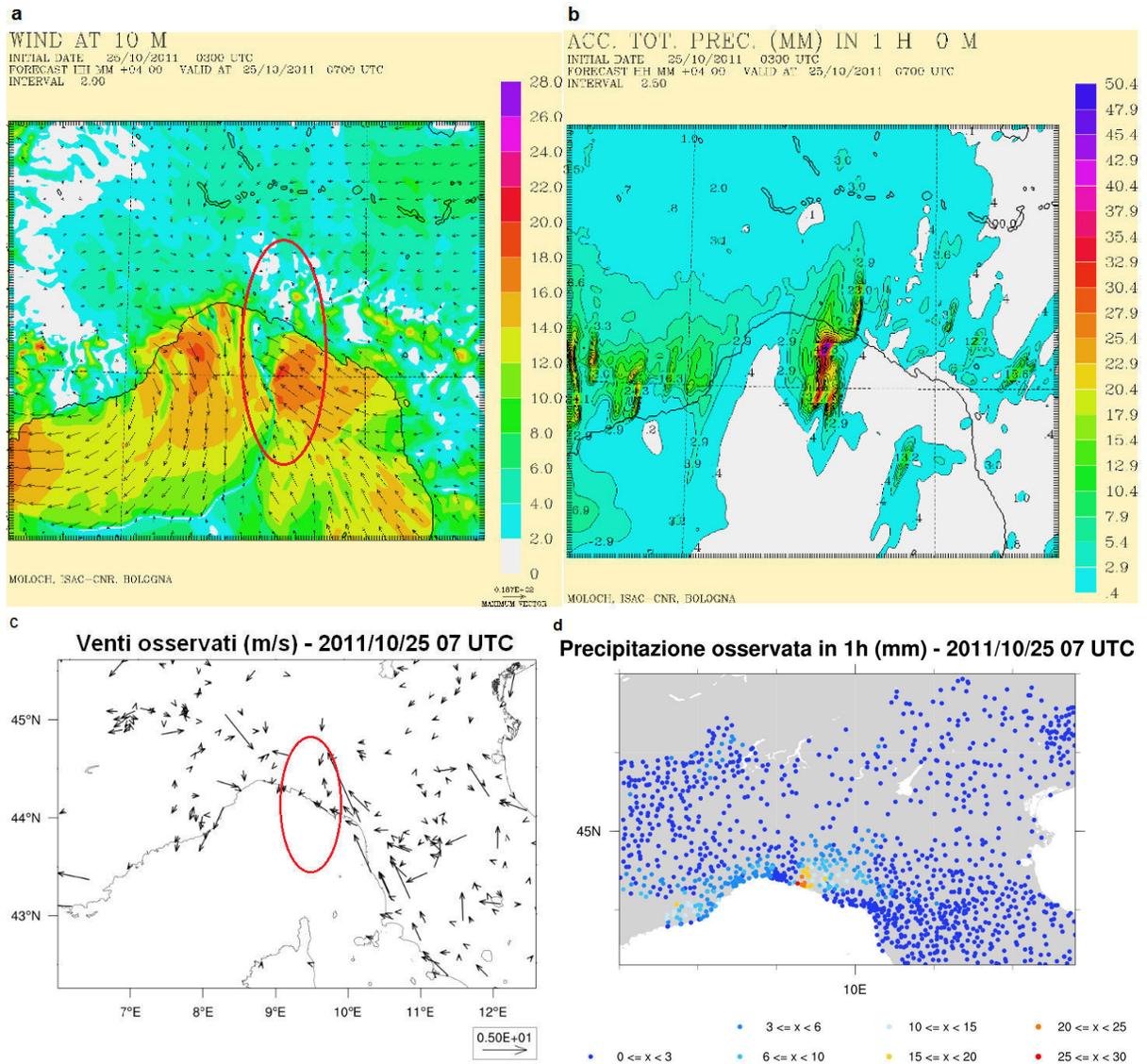


Figura 53: Mappe del modello MOLOCH inizializzato alle ore 03 UTC del 25 ottobre (previsione a +4h) con risoluzione orizzontale di 1 km del campo di vento previsto (a), e (b) della stima della precipitazione prevista in 1h, (c) mappe del campo di vento osservato e (d) della precipitazione osservata al suolo, riferite alle 07 UTC (Fonte: ARPAL). In evidenza l'area di convergenza appena sviluppatasi tra il flusso settentrionale, freddo e secco, e quello sud-orientale caldo e umido.

## 5.1 Evento delle Cinque Terre

L'episodio che ha interessato nelle prime ore del pomeriggio le Cinque Terre e in generale il levante ligure è stato determinato probabilmente da alcuni fattori che hanno contribuito ad innescare un sistema convettivo quasi stazionario: la presenza di una massa d'aria fredda nei bassi strati (cold pool) sulla Pianura Padana, la formazione di un'area di convergenza fra il flusso settentrionale e quello meridionale, rispettivamente ad ovest e ad est delle Cinque Terre, e la complessa struttura orografica locale e non, in grado anche di influenzare l'effettiva durata ed intensità del sistema convettivo.

La fig.52a mostra il campo di vento negli strati bassi atmosferici, simulato da MOLOCH ad 1 km di passo di griglia: si può notare come venga prevista in maniera sufficientemente precisa la linea di convergenza venutasi a formare tra il freddo outflow in uscita dalle valli genovesi e savonesi, e il low level jet più caldo e umido proveniente da sud-est. In particolare si nota come, nel primo mattino, la convergenza si trovi poco più ad est del promontorio di Portofino, ovvero dove effettivamente si sono formate le prime celle convettive (Fig.52c). A conferma della presenza di questi due flussi aventi origini diverse, si nota dalla Fig.52b il forte gradiente termico fra il mar Ligure e la zona a nord degli Appennini, di circa 11 °C.

Confrontando le mappe relative ai venti (Fig.53a) e alle precipitazioni (Fig.53b) previste da MOLOCH a 1 km di risoluzione orizzontale con quelli effettivamente osservati al suolo (Fig.53c e Fig.53d), relative alle ore 07 UTC, si può notare come il modello nella fase iniziale dell'evento abbia sviluppato in modo abbastanza dettagliato le dinamiche del sistema convettivo appena formatosi. Il campo di vento simulato dal modello risulta essere sufficientemente simile a quello osservato: l'area di convergenza fra i due flussi comprende il promontorio di Portofino e la zona ad ovest delle Cinque Terre.

La mappa delle precipitazioni simulate dal modello mostra questa struttura convettiva davanti al largo di Portofino, dove viene previsto il massimo accumulo di pioggia, e precipitazioni abbastanza intense ad est del promontorio, con cumulata prevista di circa 20-30 mm, quindi non dissimile a quella effettivamente misurata al suolo.

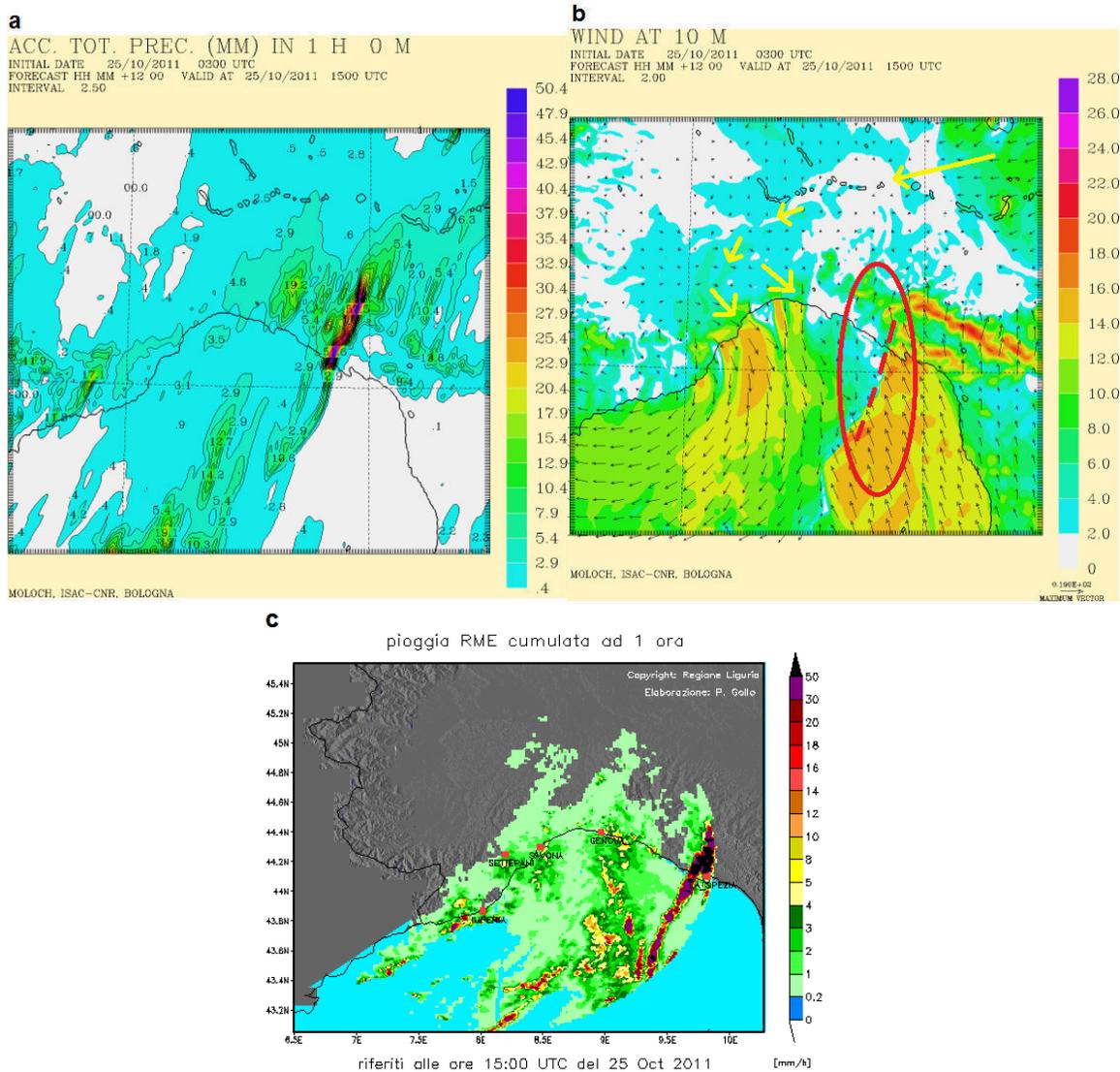


Figura 54: Mappe di MOLOCH inizializzato alle ore 03 UTC del 25 ottobre (previsione a +12h) con risoluzione orizzontale di 1 km di stima della cumulata della precipitazione prevista in 1h (a), (b) del campo di vento a 10 m e (c) immagine radar riferita alle ore 15 UTC che mostra le precipitazioni intense nell'area delle Cinque Terre (Fonte: ARPAL). In evidenza la linea di convergenza formatasi tra i due flussi aventi origine e direzione opposti.

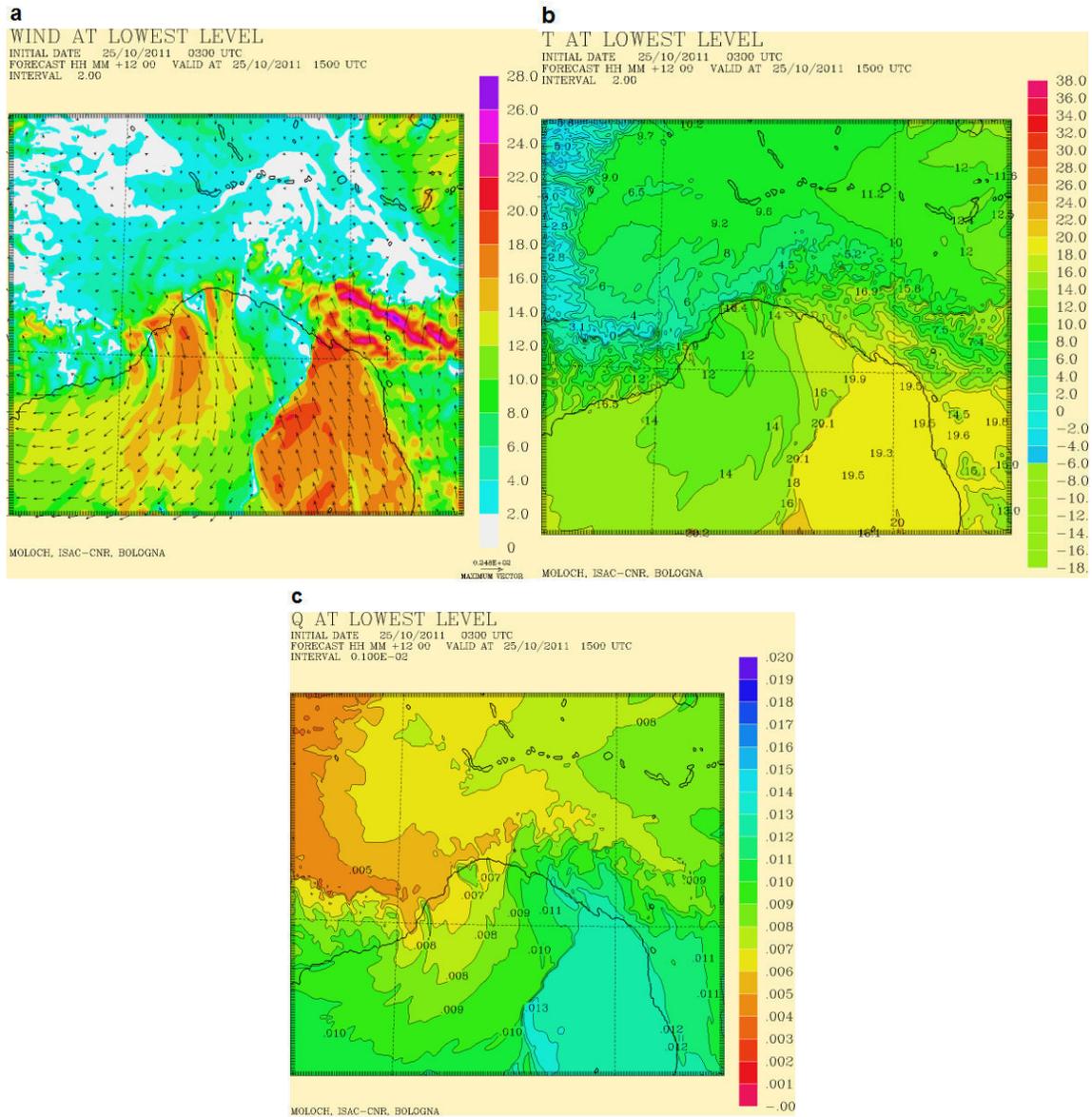


Figura 55: Mappe di previsione del modello MOLOCH inizializzato alle ore 03 UTC del 25 ottobre (previsione a +12h) con risoluzione orizzontale di 1 km relative al campo di vento (a), (b) alla temperatura, e (c) all'umidità specifica, previsti al primo livello (circa 60m).

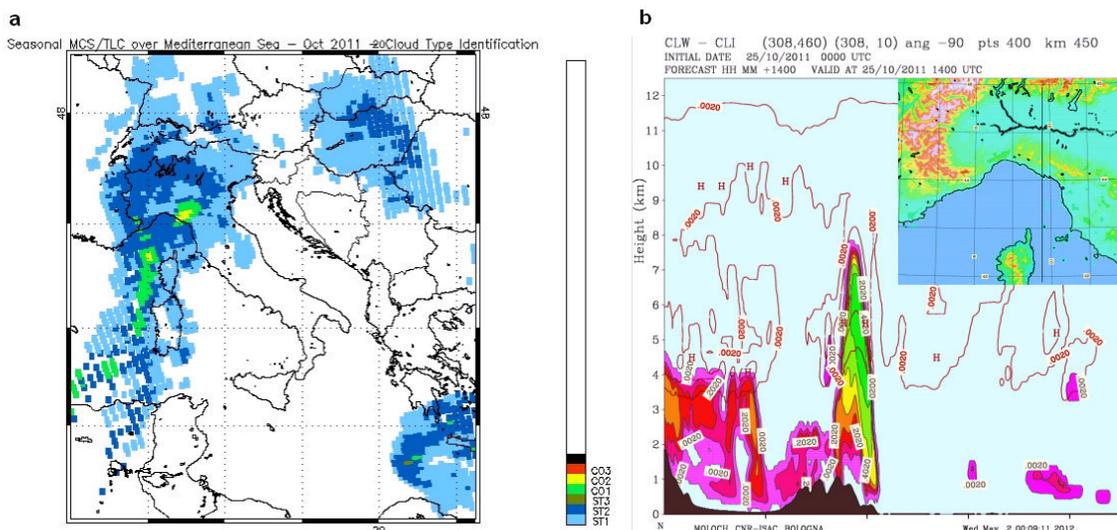


Figura 56: Mappa effettuata con algoritmo 183-WSL, relativa all'identificazione del tipo di nube, riferita al 25 ottobre (a) e (b) sezione nord-sud simulata da MOLOCH, inizializzato alle ore 00 UTC del 25 ottobre (previsione a +14h), per la ricerca di nubi di ghiaccio o acqua.

Analizzando più dettagliatamente l'evento, in particolare il periodo in cui il sistema convettivo ha prodotto la maggior parte delle precipitazioni, arrecando i danni maggiori alle persone e alle cose, risulta ben evidente la presenza di un moderato outflow freddo e relativamente secco proveniente dalla valle del Po, presente da Genova verso Ovest, alimentato a sua volta dai venti di barriera prodotti dalle Alpi centro-orientali sulla Pianura Padana, che assume maggior forza in mare (Fig.54b). Inoltre, si può notare come questo flusso di aria relativamente fredda e secca, rinvigorendo la cold pool già presente a causa del downdraft associato al sistema temporalesco organizzato, vada a convergere con il low level jet (LLJ) caldo e umido proveniente dall'alto Tirreno lungo una linea di convergenza rimasta stazionaria per diverse ore, capace di mantenere attiva la convezione e di permettere l'esatta localizzazione del MCS (Fig.54c). Si può osservare come il sistema precipitante assuma una forma lineare (*squall line*) sviluppatasi sulla superficie marina, ma modificata ed intensificata dalla conformazione orografica. Inoltre, la localizzazione spazio-temporale e la stima del quantitativo di precipitazione sono molto ben simulate dal modello preso in esame, specificatamente con risoluzione orizzontale di 1 km (Fig.54a).

È utile, inoltre, riuscire ad avere un quadro più completo riguardante il flusso nei bassi livelli: per far ciò è importante confrontare alcuni parametri fisici al primo livello atmosferico, ovvero ad una quota di circa 60 m dal suolo. Ancora una volta risulta evidente il forte outflow presente nei bassi strati, proveniente dalla Pianura Padana, localizzato ad Ovest di Genova, che si sovrappone al già potente outflow associato al sistema temporalesco ed in grado di dare supporto alla linea di convergenza, rendendola stazionaria per diverse ore (Fig.55a). Ciò implica un equilibrio tra il flusso caldo e umido proveniente da sud-est e quello più freddo e secco da nord-ovest, permettendo così l'esatta localizzazione del sistema convettivo.

Da notare anche il forte gradiente termico previsto fra l'area del Cuneese e il bacino orientale del Golfo Ligure, di circa 13-14 °C (Fig.55b), così come è evidente il gradiente di umidità specifica tra le due zone sopra citate, di circa 0.007  $kg_v/kg$  (Fig.55c). Attraverso l'algoritmo 183-WSL (Laviola e Levizzani, 2011), si riesce a produrre uno schema del tipo di nubi (convettive o stratiformi) presenti quel giorno e, adoperando dati da sensori satellitari AMSU-B e canali PMW differenti, si può anche stabilire con buona approssimazione la quota delle nubi più alte.

Come si può notare, anche confrontando l'immagine ottenuta (Fig.56a) con la sezione nord-sud simulata da MOLOCH, avente lo scopo di trovare tracce di nubi di ghiaccio o di acqua (Fig.56b), il sistema convettivo è facilmente identificato e il top delle nubi risulta essere all'incirca a 7-8 km, quindi ben al di sotto dell'altezza della tropopausa.

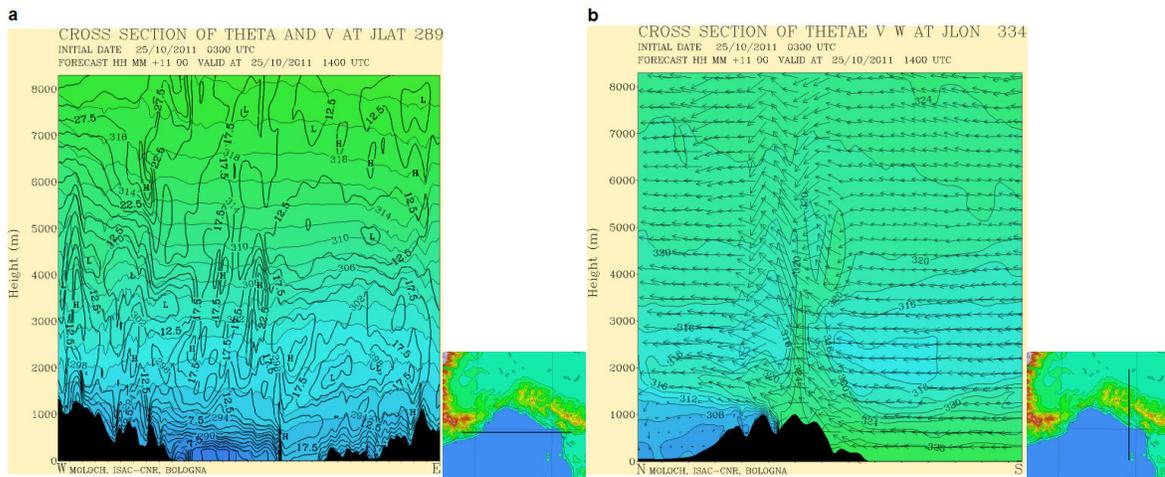


Figura 57: Mappe effettuate da MOLOCH a 1.5 km di passo di griglia, inizializzate alle ore 03 UTC del 25 ottobre (previsione a +11h), relative alle cross-sections ovest-est della stima della temperatura potenziale e del moto nel piano verticale previsti (a), e (b) nord-sud della temperatura potenziale equivalente e del moto nel piano verticale previsti.

Ulteriori approfondimenti vengono forniti dalle cross-sections simulate da MOLOCH a 1.5 km di risoluzione orizzontale (Fig.57a e Fig.57b). Nell'immagine a sinistra, che si riferisce alla sezione ovest-est prevista alle ore 14 UTC (Fig.57a), risultano ben evidenti l'outflow freddo e secco, con massimo vicino al suolo, ad ovest delle Cinque Terre, e il flusso caldo e umido più ad est che raggiunge il valore massimo alla quota di 600 m circa. Nell'immagine a destra, che mostra la sezione nord-sud, riferita allo stesso orario (Fig.57b), si può notare come la cold pool sia ben presente al di là dell'Appennino ligure e come il sollevamento indotto dalla pendenza della montagna incentivi la convezione anche sopra di essa. Focalizzando l'attenzione, invece, sulle sezioni ovest-est della temperatura potenziale equivalente e del moto nel piano verticale, lungo le linee indicate con C1 e C2 che intersecano entrambe la suddetta linea di convergenza, e mostrando l'evoluzione nel tempo simulata da MOLOCH a 1.5 km di risoluzione, prima alle ore 07 UTC (Fig.58a e Fig.58b) e dopo alle ore 17 UTC (Fig.59a e Fig.59b), risulta essere interessante come la zona di massimo sollevamento dell'aria e di separazione tra la cold pool, che si trova principalmente nei bassi strati (a sinistra), e il flusso di aria più calda e umida proveniente da sud-est (a destra), si sposti verso est.

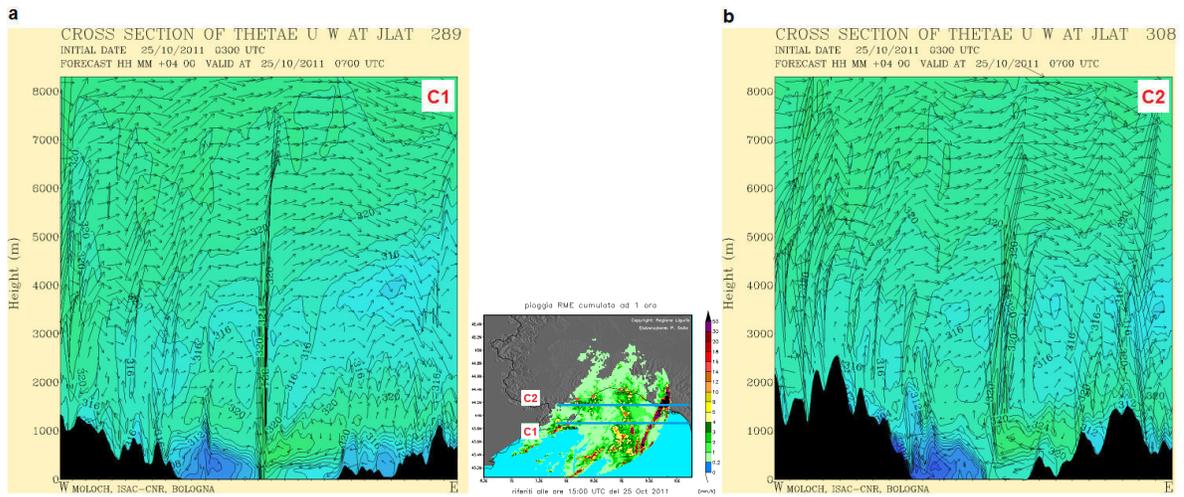


Figura 58: Mappe simulate da MOLOCH a 1 km di passo di griglia, inizializzate alle ore 03 UTC del 25 ottobre (previsione a +4h), relative alle cross-sections ovest-est per la stima della temperatura potenziale equivalente e del moto nel piano verticale lungo la linea C1 (a) e (b) la linea C2.

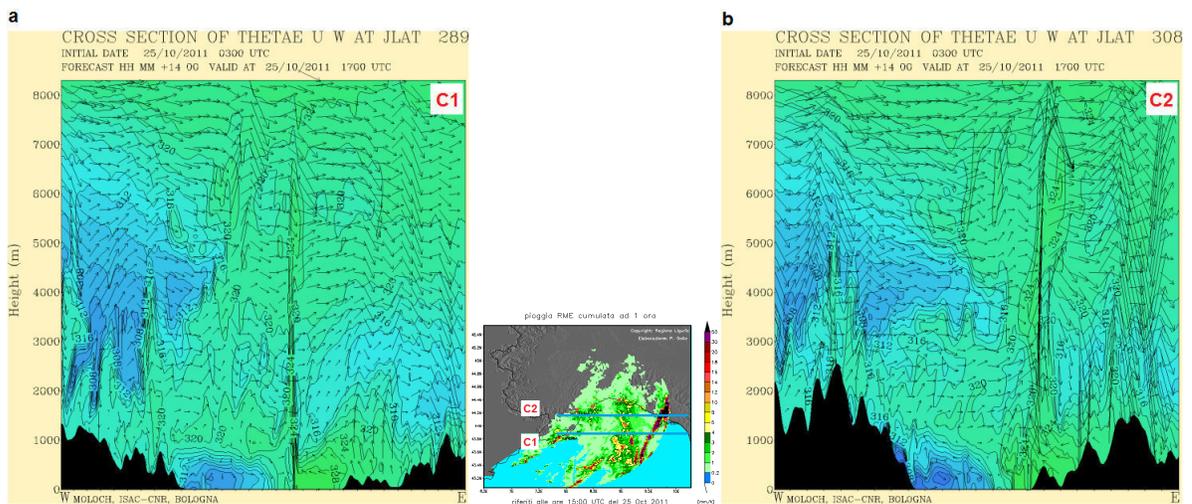


Figura 59: Mappe simulate da MOLOCH a 1.5 km di passo di griglia, inizializzate alle ore 03 UTC del 25 ottobre (previsione a +14h), relative alle cross-sections ovest-est per la stima della temperatura potenziale equivalente e del moto nel piano verticale lungo la linea C1 (a) e (b) la linea C2.

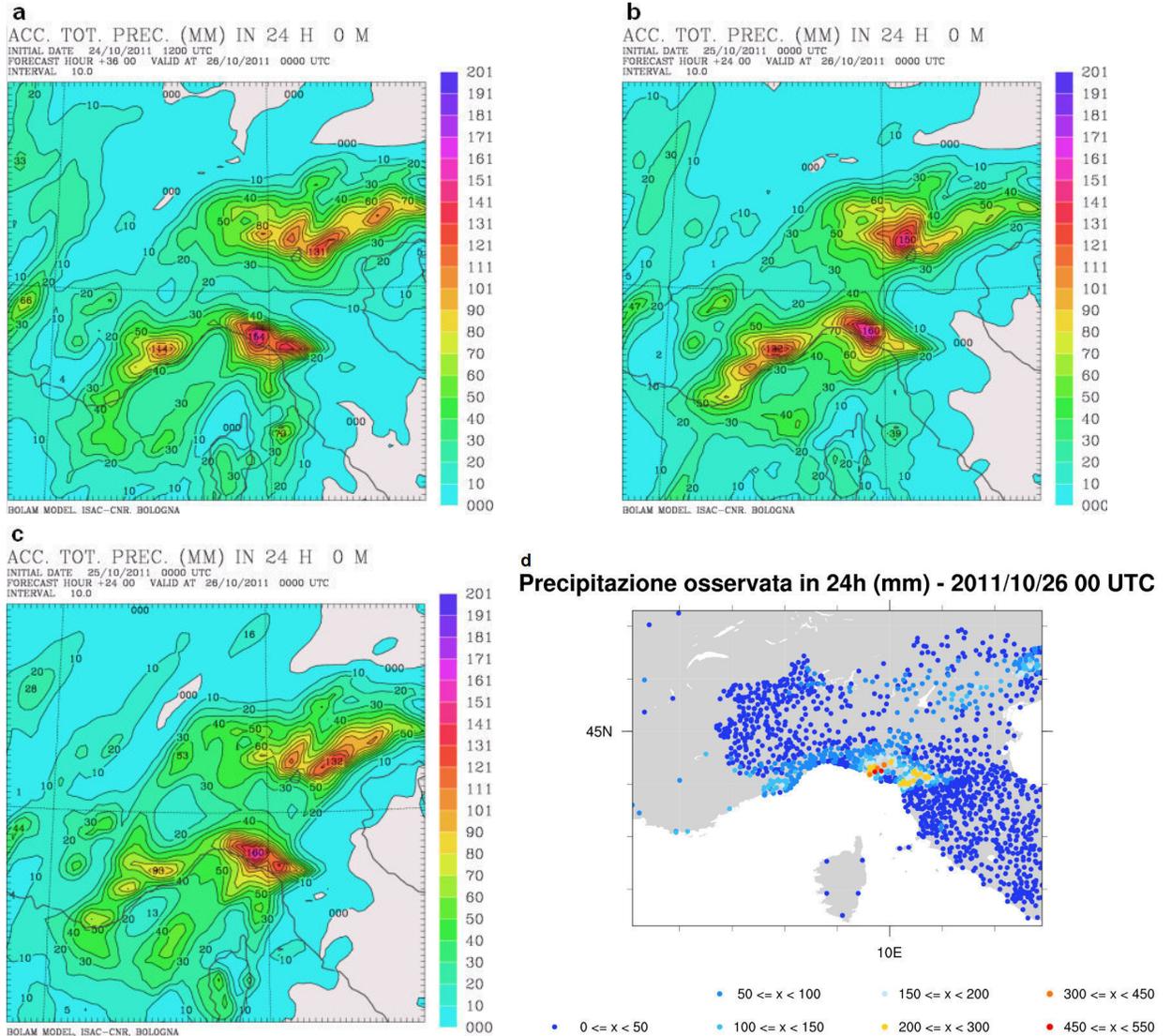


Figura 60: Mappe che mostrano la precipitazione cumulata prevista in 24h (dalle 00 UTC del 25 ottobre alle 00 UTC del 26 ottobre) dal modello BOLAM10 inizializzato alle 12 UTC del 24 ottobre (previsione a +36h) (a) e (b) alle 00 UTC del 25 ottobre (previsione a +24h) su dati delle analisi (e successive previsioni come condizioni al contorno) NOAA, (c) inizializzato alle 00 UTC del 25 ottobre (previsione a +24h) su dati delle analisi (e successive previsioni) ECMWF, e (d) mappa che mostra la cumulata osservata nello stesso intervallo di tempo (Fonte: ARPAL).

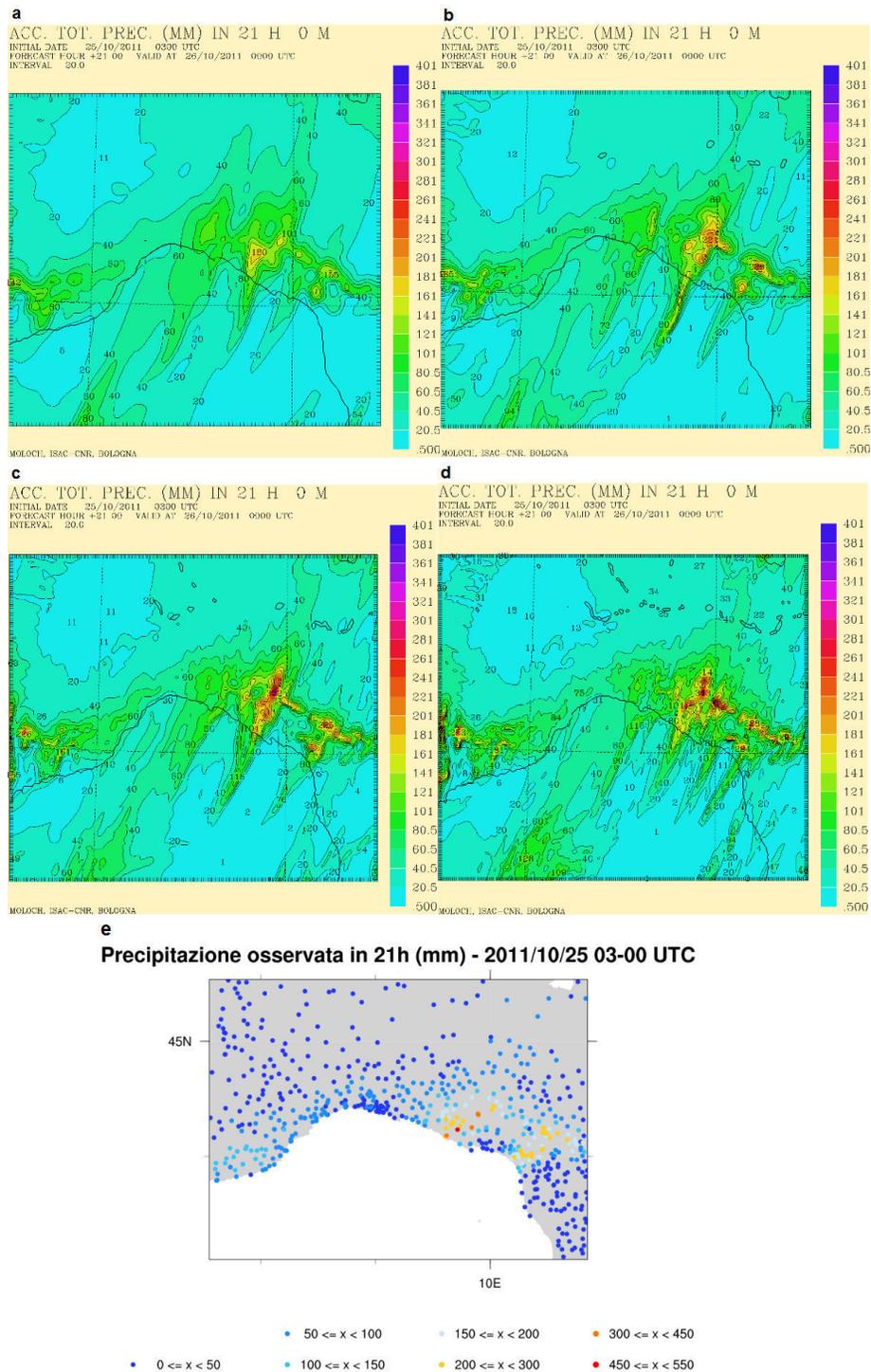


Figura 61: Mappe relative alla precipitazione cumulata prevista in Liguria 21h (dalle 03 UTC del 25 ottobre alle 00 UTC del 26 ottobre) dal modello MOLOCH inizializzato alle 03 UTC del 25 ottobre (previsione a +21h) con risoluzione orizzontale di 3 km (a), (b) di 2 km, (c) di 1.5 km, (d) di 1 km, e (e) mappa che mostra la cumulata osservata nello stesso intervallo di tempo (Fonte: ARPAL).

<b>Precipitazione cumulata in 24h – 2011/10/26 00 UTC</b>			
<b>NOAA/GFS 2011/10/24 12 UTC</b>	<b>NOAA/GFS 2011/10/25 00 UTC</b>	<b>ECMWF/IFS 2011/10/25 00 UTC</b>	<b>Osservata</b>
<b>154 mm</b>	<b>160 mm</b>	<b>160 mm</b>	<b>539 mm</b>

Tabella 1: Tabella riassuntiva dei valori massimi di precipitazione prevista in Liguria in 24h (dalle 00 UTC del 25 ottobre alle 00 UTC del 26 ottobre) da BOLAM10 al variare delle condizioni iniziali e al contorno dei due modelli globali (NOAA/GFS e ECMWF/IFS) e il valore massimo di precipitazione osservato a Borghetto Vara nello stesso intervallo di tempo (Fonte: ARPAL).

<b>Precipitazione cumulata in 21h – 2011/10/25 03-00 UTC</b>				
<b>3 km</b>	<b>2 km</b>	<b>1.5 km</b>	<b>1 km</b>	<b>Osservata</b>
<b>180 mm</b>	<b>221 mm</b>	<b>332 mm</b>	<b>313 mm</b>	<b>532 mm</b>

Tabella 2: Tabella riassuntiva dei valori massimi di precipitazione prevista in Liguria in 21h (dalle 03 UTC del 25 ottobre alle 00 UTC del 26 ottobre) da MOLOCH inizializzato su dati delle analisi (e successive previsioni come condizioni al contorno) NOAA al variare della risoluzione orizzontale, e il valore massimo di precipitazione osservato a Borghetto Vara nello stesso intervallo di tempo (Fonte: ARPAL).

La sensibilità della QPF a diverse condizioni iniziali e al contorno dei due modelli globali (ECMWF/IFS e NOAA/GFS) ha dato, come da attese, risultati differenti. Per quanto riguarda le simulazioni guidate di BOLAM, c'è stata una generale e significativa sottostima delle precipitazioni previste sul levante ligure (Tab.1), ma è riscontrabile una QPF soddisfacente sul nord-est in prossimità delle Alpi centro-orientali e sul settore occidentale della Liguria (Fig.60a, Fig.60b e Fig.60c), confrontandola anche con le precipitazioni effettivamente osservate (Fig.60d). Grosso modo si riscontra una debole sensibilità della QPF alle diverse condizioni iniziali.

Per quanto riguarda, invece, le simulazioni guidate di MOLOCH inizializzato su dati delle analisi (e successive previsioni) NOAA, della stima della precipitazione prevista in 21 ore (dalle 03 UTC del 25 ottobre alle 00 UTC del 26 ottobre) osservando le Fig.61 (a-b-c-d-e) si nota come il modello abbia fornito complessivamente un'ottima prestazione per quanto riguarda la localizzazione del sistema convettivo, pur sottostimando in generale la QPF.

Risulta evidente il miglioramento della prestazione all'aumentare della risoluzione orizzontale (Tab.2): tuttavia il valore più alto di precipitazione prevista nell'intervallo di tempo considerato viene mostrato dal modello con passo di griglia di 1.5 km.

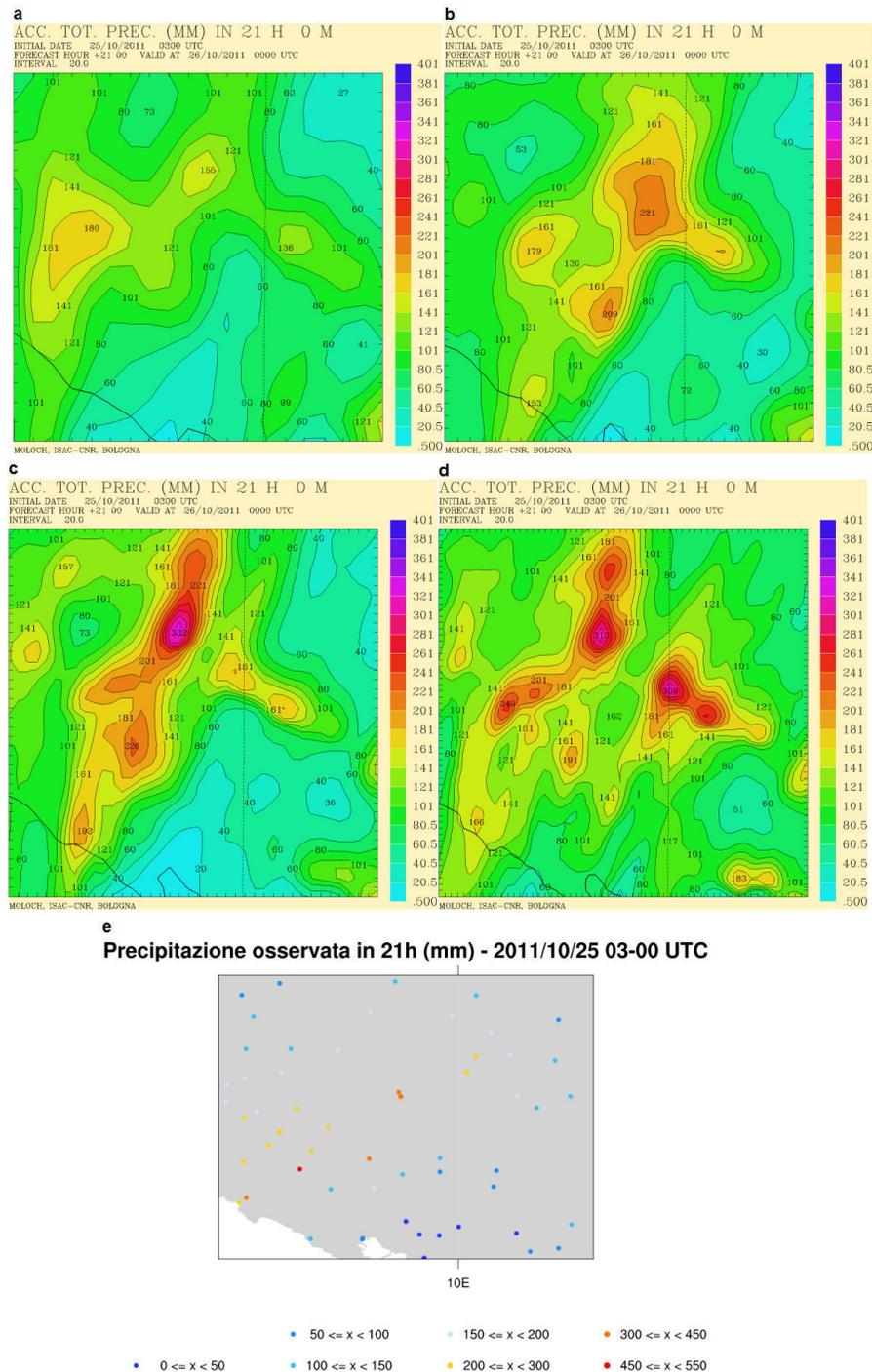


Figura 62: Mappe relative alla precipitazione cumulata media areale prevista in 21h (dalle 03 UTC del 25 ottobre alle 00 UTC del 26 ottobre) dal modello MOLOCH inizializzato alle 03 UTC del 25 ottobre (previsione a +21h) con risoluzione orizzontale di 3 km (a), (b) di 2 km, (c) di 1.5 km, (d) di 1 km, e (e) mappa relativa alla precipitazione osservata nello stesso intervallo di tempo e nella medesima area (Fonte: ARPAL). In basso a sinistra di ogni figura si può notare il tratto di costa della zona delle Cinque Terre e della provincia di La Spezia.

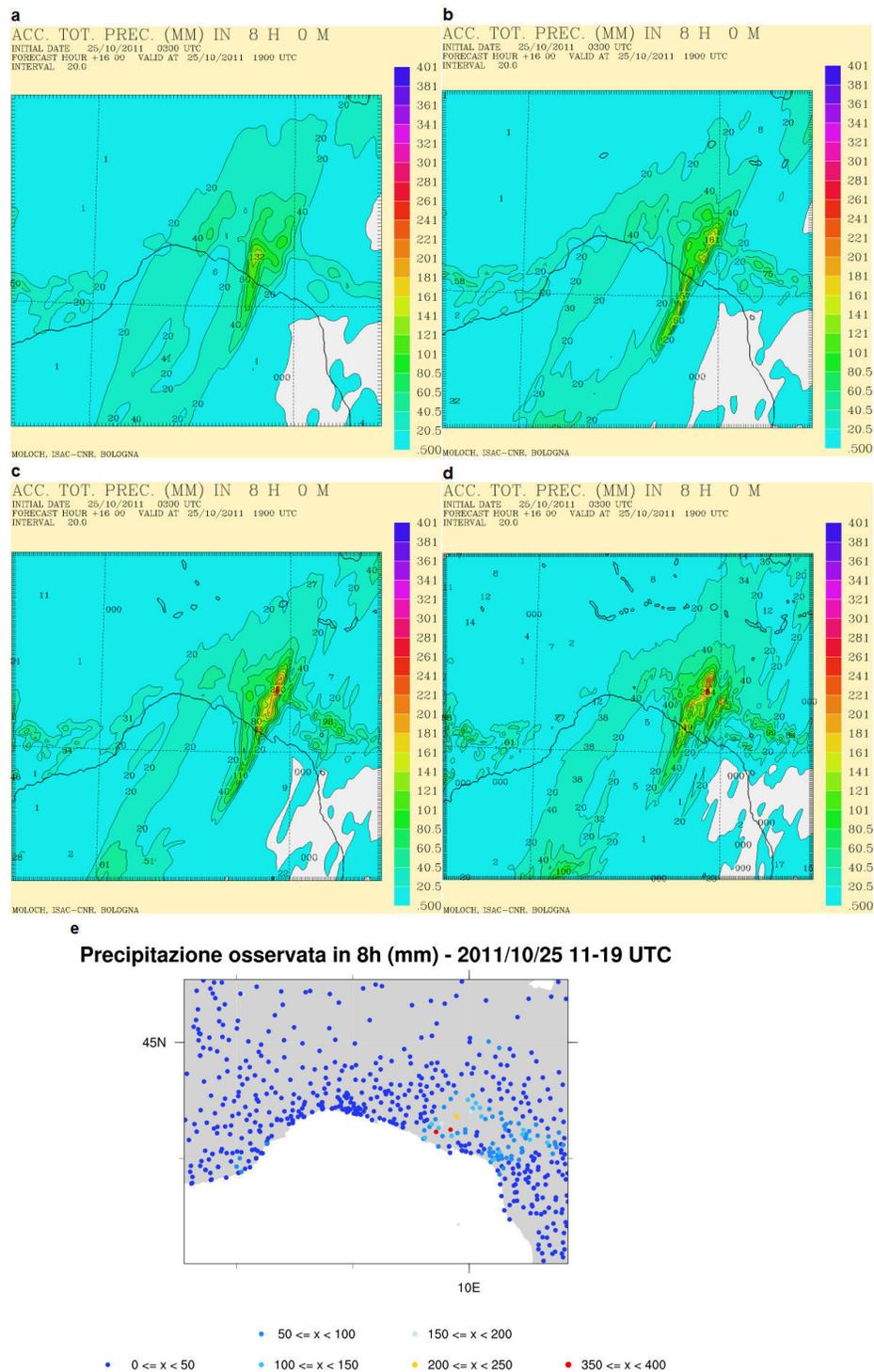


Figura 63: Mappe relative alla precipitazione cumulata prevista in Liguria in 8h (dalle 11 UTC alle 19 UTC del 25 ottobre) dal modello MOLOCH inizializzato alle 03 UTC del 25 ottobre (previsione a +16h) con risoluzione orizzontale di 3 km (a), (b) di 2km, (c) di 1.5 km, (d) di 1 km, e (e) mappa che mostra la cumulata osservata nello stesso intervallo di tempo (Fonte: ARPAL).

<b>Precipitazione cumulata media areale in 21h 2011/10/25 03-00 UTC</b>				
<b>3 km</b>	<b>2 km</b>	<b>1.5 km</b>	<b>1 km</b>	<b>Stimata</b>
<b>86 mm</b>	<b>95 mm</b>	<b>99 mm</b>	<b>118 mm</b>	<b>165 mm</b>

Tabella 3: Tabella riassuntiva dei valori di precipitazione cumulata media areale prevista in 21h (dalle 03 UTC del 25 ottobre alle 00 UTC del 26 ottobre) da MOLOCH inizializzato su dati delle analisi (e successive previsioni come condizioni al contorno) NOAA al variare della risoluzione orizzontale e valore stimato di precipitazione cumulata media osservata nello stesso intervallo di tempo e sulla medesima area (Fonte: ARPAL).

<b>Precipitazione cumulata in 8h – 2011/10/25 11-19 UTC</b>				
<b>3 km</b>	<b>2 km</b>	<b>1.5 km</b>	<b>1 km</b>	<b>Osservata</b>
<b>132 mm</b>	<b>161 mm</b>	<b>250 mm</b>	<b>254 mm</b>	<b>371 mm</b>

Tabella 4: Tabella riassuntiva dei valori massimi di precipitazione prevista in Liguria in 8h (dalle 11 UTC alle 19 UTC del 25 ottobre) da MOLOCH inizializzato su dati delle analisi (e successive previsioni come condizioni al contorno) NOAA al variare della risoluzione orizzontale, e il valore massimo di precipitazione osservato a Borghetto Vara nello stesso intervallo di tempo (Fonte: ARPAL).

Si considera opportuno far notare che il modello ad 1 km di risoluzione orizzontale prevede più picchi precipitativi in un'area molto ristretta. A tal proposito, si ritiene importante analizzare anche la cumulata di precipitazione a scala areale simulata, nello stesso intervallo di tempo, da MOLOCH, prendendo in considerazione un'area di  $3600 \text{ km}^2$  (60 km x 60 km), nel levante ligure e comprendente la zona delle Cinque Terre e la Val di Vara (Fig.62 a-b-c-d), confrontandola con la mappa delle precipitazioni osservate sulla medesima area considerata (Fig.62e). Analizzando e confrontando i risultati ottenuti (Tab.3), si nota come ad un aumento della risoluzione orizzontale corrisponda un aumento della cumulata media simulata e di conseguenza un miglioramento delle prestazioni fornite dal modello. In particolare, si osserva come, in questo caso, il modello ad 1 km di risoluzione orizzontale simuli il più alto quantitativo di cumulata media areale, avvicinandosi maggiormente al valore stimato di precipitazione media sulla stessa area, a differenza della previsione della precipitazione cumulata puntuale.

Concentrando, invece, l'attenzione sulla cumulata prevista in 8 ore (dalle 11 UTC alle 19 UTC) mostrata in Fig.63 (a-b-c-d-e) si nota come, anche in questo caso, le prestazioni del modello migliorino all'aumentare della risoluzione (Tab.4).

Complessivamente si possono ritenere buone le prestazioni del modello, in particolare per quanto riguarda la localizzazione spazio-temporale del sistema convettivo: si ipotizza che, ad alte risoluzioni, il modello riesca a simulare in maniera più dettagliata i fattori presenti su scala molto piccola (dell'ordine di 1 km circa) che caratterizzano la formazione e lo sviluppo di questo tipo di sistemi convettivi, in particolare l'evaporazione della precipitazione e il downdraft associato.

Si è dimostrata essere rilevante la sensibilità della QPF (generalmente sottostimata) ai diversi passi di griglia utilizzati: le simulazioni numeriche di MOLOCH hanno evidenziato in larga parte un miglioramento della stima della precipitazione prevista all'aumentare della risoluzione orizzontale.

## 5.2 Evento di Genova

Come per il caso delle Cinque Terre, alcuni tra i principali elementi responsabili della formazione del sistema convettivo sono individuabili in Fig.64a, che rappresenta la simulazione di MOLOCH ad 1 km di passo di griglia del campo dei venti a 950 hPa: a differenza però dell'evento esaminato precedentemente la linea di convergenza, che si è formata tra il flusso settentrionale e quello sud-orientale, è spostata più ad ovest verso il capoluogo ligure. La Fig.64b mostra come la linea di separazione fra i due flussi aventi caratteristiche e origini opposte sia più traslata verso ovest rispetto al caso delle Cinque Terre: il gradiente termico, minore rispetto al caso del 25 ottobre, presente fra il mar Ligure e la zona a nord degli Appennini è risultato essere di circa 8 °C. Dall'immagine satellitare di Fig.64c si nota il sistema convettivo che successivamente traslerà verso Genova.

La precipitazione osservata al suolo (Fig.65d) è risultata essere leggermente più intensa e spostata verso est rispetto a quella prevista da MOLOCH a 1 km di risoluzione orizzontale (Fig.65b): il modello prevede un collocamento della parte più intensa del sistema convettivo sul mare davanti al settore centrale della Liguria. Per quanto riguarda le mappe relative ai venti previsti dal modello (Fig.65a) si nota uno spostamento verso ovest della convergenza rispetto a quelli realmente osservati (Fig.65c), a differenza dell'evento delle Cinque Terre, in cui si sono ottenuti buoni risultati per quanto concerne la localizzazione spazio-temporale del sistema temporalesco.

Diversamente dal caso del 25 ottobre, la precipitazione oraria (11 UTC) simulata da MOLOCH ad 1 km di risoluzione orizzontale (Fig.66a) ha prodotto una significativa sottostima e una traslazione verso ovest di circa 20-30 km del sistema convettivo rispetto alla sua effettiva localizzazione ed intensità (Fig.66c e Fig.66d). La mappa del campo di vento simulato dal modello (Fig.66b) mostra la posizione dell'area di convergenza prevista ad ovest di Genova. Dalla Fig.67a emerge come sia presente una zona di convergenza fra il flusso settentrionale e il LLJ sud-orientale prevista da MOLOCH ad 1 km di passo di griglia poco ad ovest di Genova. In Fig.67b viene mostrata la temperatura al primo livello (circa 60 m dal suolo), prevista dal modello, dalla quale si nota un elevato gradiente termico (circa 10 °C), seppur minore rispetto al caso delle Cinque Terre, fra le zone a nord dell'Appennino ligure e il settore centrale del Mar Ligure. Il valore del gradiente di umidità specifica simulata dal modello fra le zone sopra citate (Fig.67c) è piuttosto simile (circa 0.007  $kg_v/kg$ ) a quello previsto nel caso del 25 ottobre.

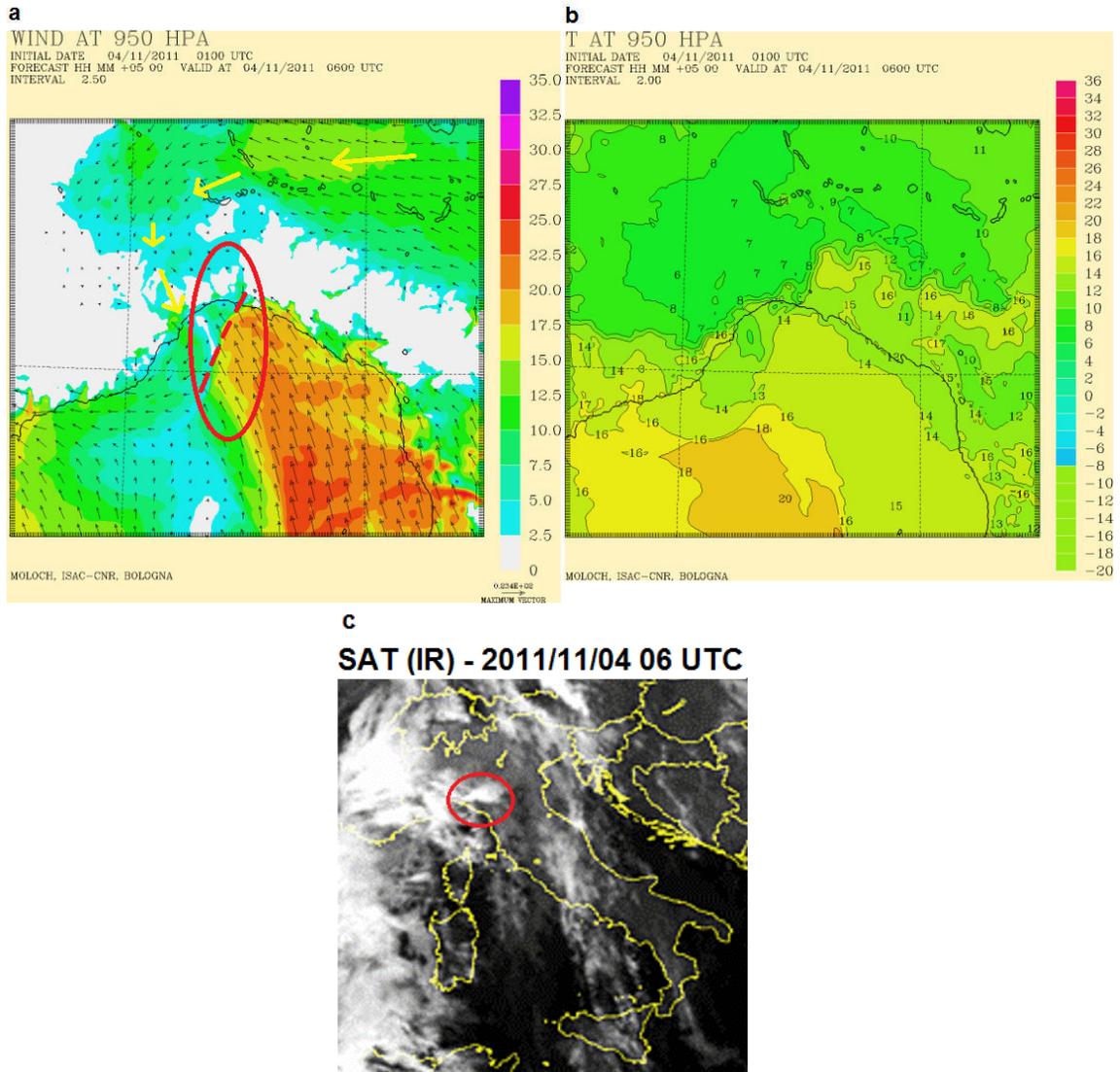


Figura 64: Mappe di previsione del modello MOLOCH inizializzato alle ore 01 UTC del 4 novembre (previsione a +5h) con risoluzione orizzontale di 1 km relative al campo di venti (a), (b) alla temperatura, previsti all'altezza geopotenziale di 950 hPa, e (c) immagine dal satellite MGS nell'infrarosso riferita alle ore 06 UTC del 4 novembre 2011 (Fonte: www.sat24.com - Eumetsat - Met Office). In evidenza la zona di convergenza fra i due flussi e il sistema convettivo situato ad est del promontorio di Portofino.

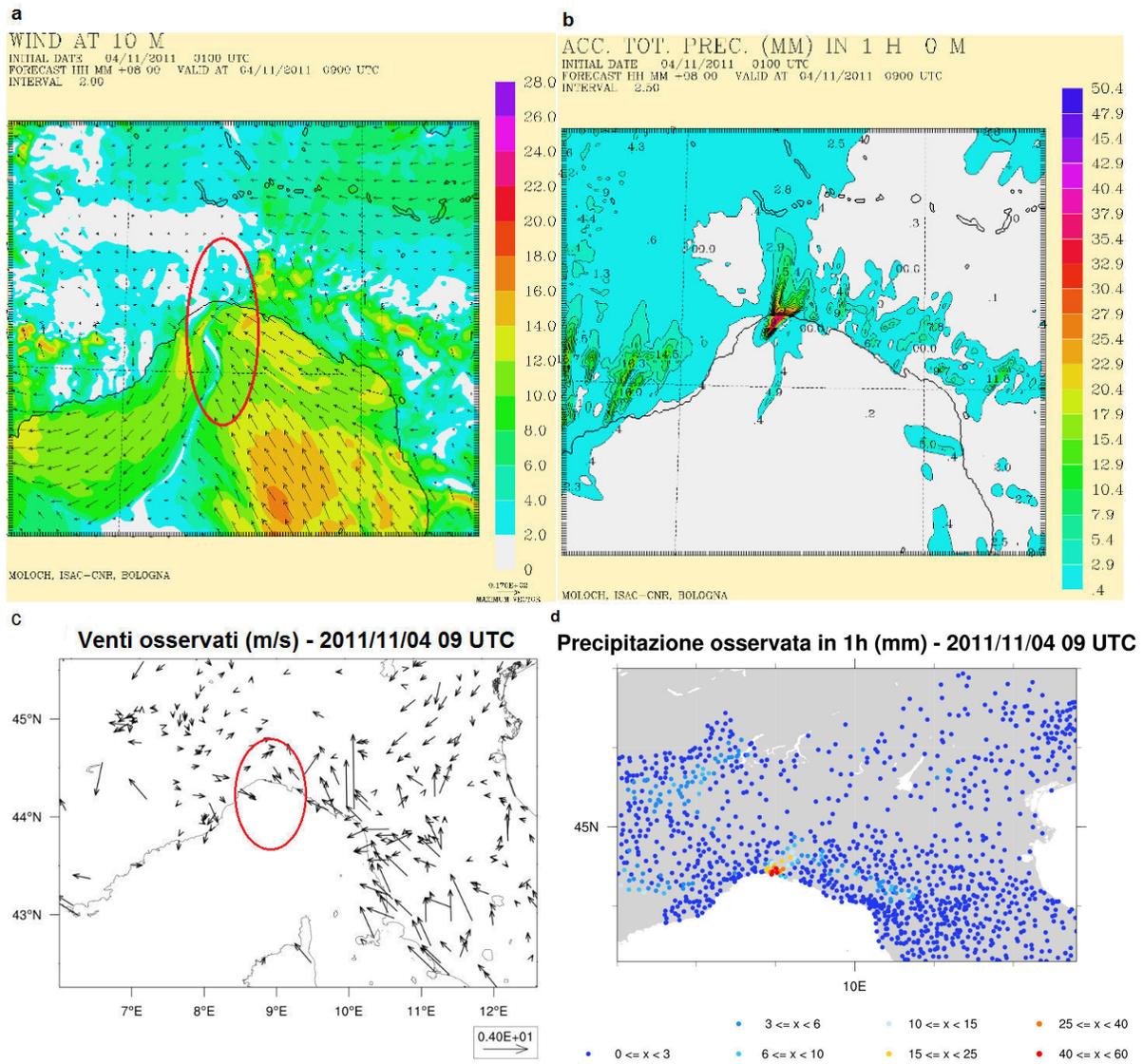


Figura 65: Mappe del modello MOLOCH inizializzato alle ore 01 UTC del 4 novembre (previsione a +8h) con risoluzione orizzontale di 1 km del campo di vento previsto (a), e (b) della stima della precipitazione prevista in 1h, (c) mappe del campo di vento osservato e (d) della precipitazione osservata al suolo, riferite alle 09 UTC (Fonte: ARPAL). In evidenza l'area di convergenza appena sviluppatasi tra il flusso settentrionale, freddo e secco, e quello sud-orientale caldo e umido.

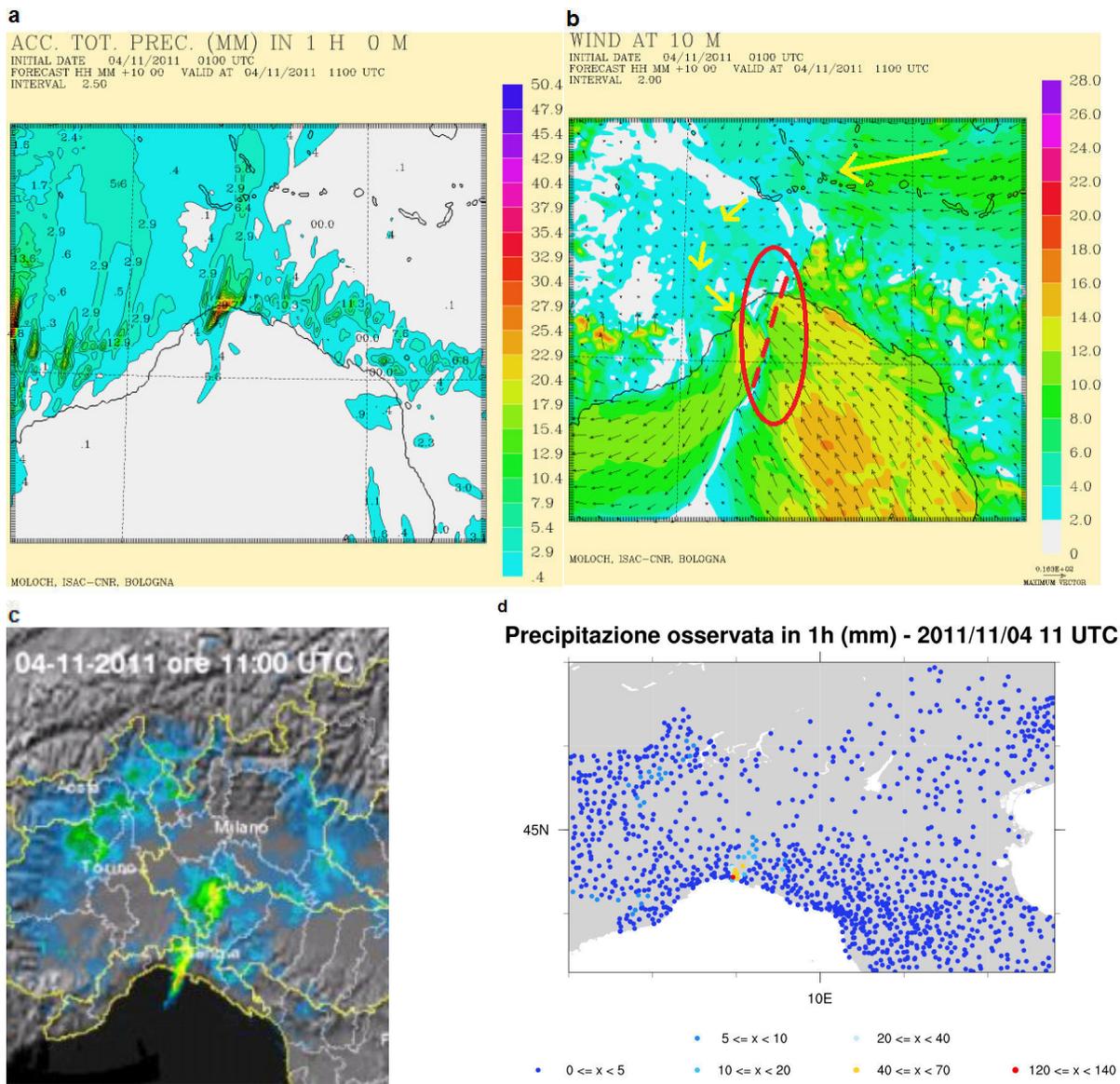


Figura 66: Mappe di MOLOCH inizializzato alle 01 UTC del 4 novembre (previsione a +10h) con risoluzione orizzontale di 1 km di stima della cumulata della precipitazione prevista in 1h (a), (b) del campo di vento a 10 m e (c) immagine radar riferita alle ore 11 UTC che mostra le precipitazioni sul capoluogo ligure (Fonte: ARPAL). In evidenza la linea di convergenza tra il flusso settentrionale e quello meridionale.

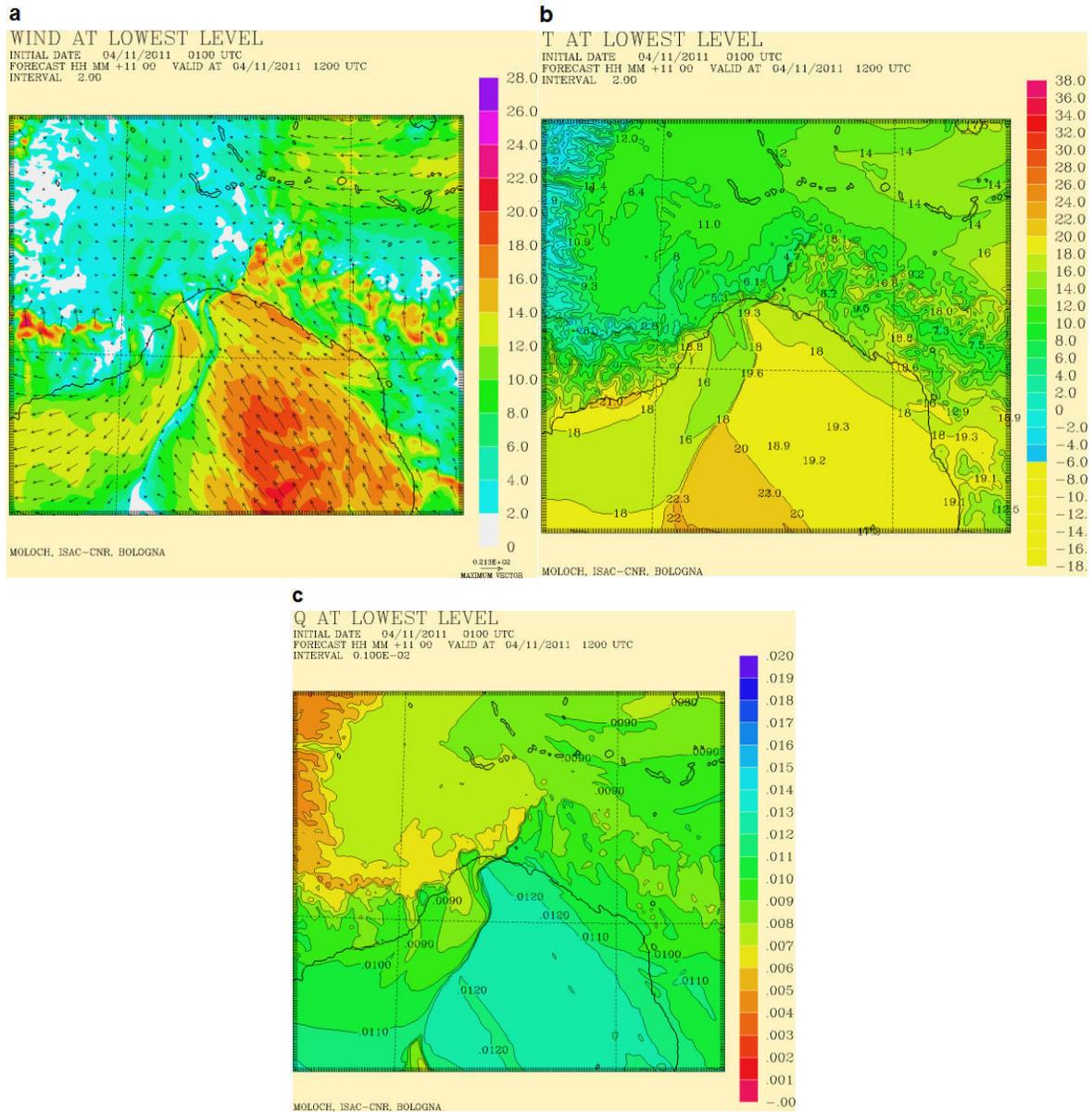


Figura 67: Mappe di previsione del modello MOLOCH inizializzato alle ore 01 UTC del 4 Novembre (previsione a +11h) con risoluzione orizzontale di 1 km relative ai campi di vento (a), (b) di temperatura, e (c) di umidità specifica, previsti al primo livello (circa 60m).

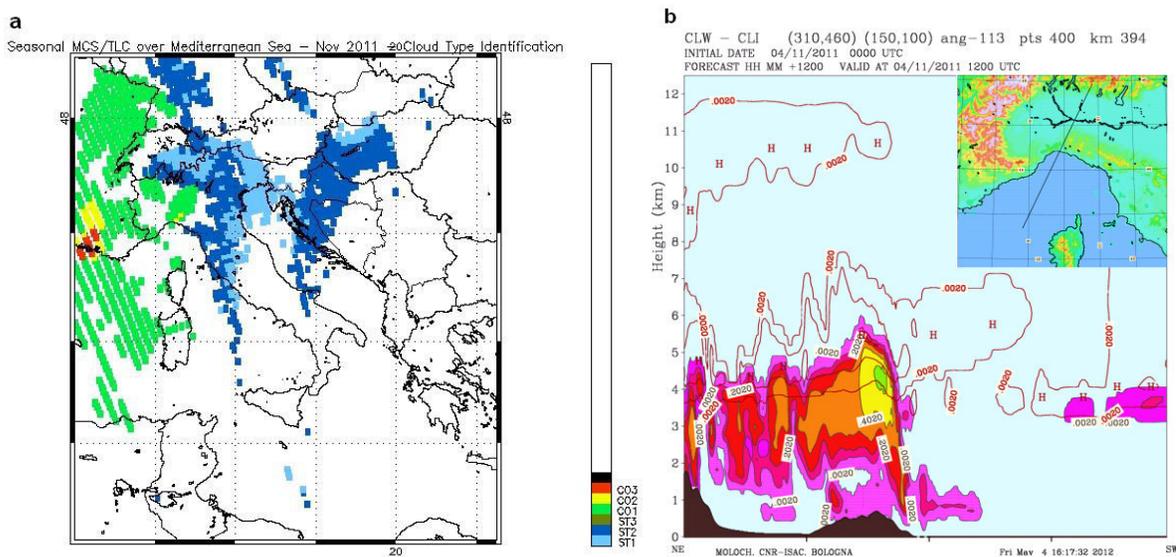


Figura 68: Mappa effettuata con algoritmo 183-WSL, relativa all'identificazione del tipo di nube, riferita al 4 novembre (a), e (b) sezione nordest-sudovest simulata da MOLOCH, inizializzato alle ore 01 UTC del 4 novembre (previsione a +12h), per la ricerca di nubi di ghiaccio o di acqua.

Adoperando l'algoritmo 183-WSL (Laviola e Levizzani, 2011) per evidenziare il tipo di nubi presenti quel giorno, e una buona approssimazione della loro quota, si può notare come, anche confrontando l'immagine ottenuta (Fig.68a) con la sezione nordest-sudovest simulata da MOLOCH, in grado di rinvenire tracce di nubi di ghiaccio o di acqua (Fig.68b), il sistema convettivo sia facilmente identificabile e il top delle nubi si trovi all'incirca a 7-8 km, quindi ben al di sotto dell'altezza della tropopausa e in linea anche con la quota nubi riscontrata per il caso del 25 ottobre.

Ulteriori approfondimenti alla questione vengono forniti dalle cross-sections simulate da MOLOCH a 1 km di risoluzione orizzontale. Nell'immagine a sinistra, che si riferisce alla sezione ovest-est prevista alle ore 11 UTC (Fig.69a), risultano ben evidenti l'outflow freddo e secco con massimo vicino al suolo, ad ovest di Genova, e il flusso più caldo e umido che raggiunge il valore massimo più ad est alla quota di 1 km circa. Nell'immagine a destra, che mostra la sezione nord-sud, riferita allo stesso orario (Fig.69b), si osserva come la cold pool si espanda per qualche km a sud di Genova: difatti è verosimile che sulla superficie marina si possa riscontrare il massimo della convergenza fra l'aria fredda depositata nei bassi strati e l'inflow caldo e umido proveniente da sud.

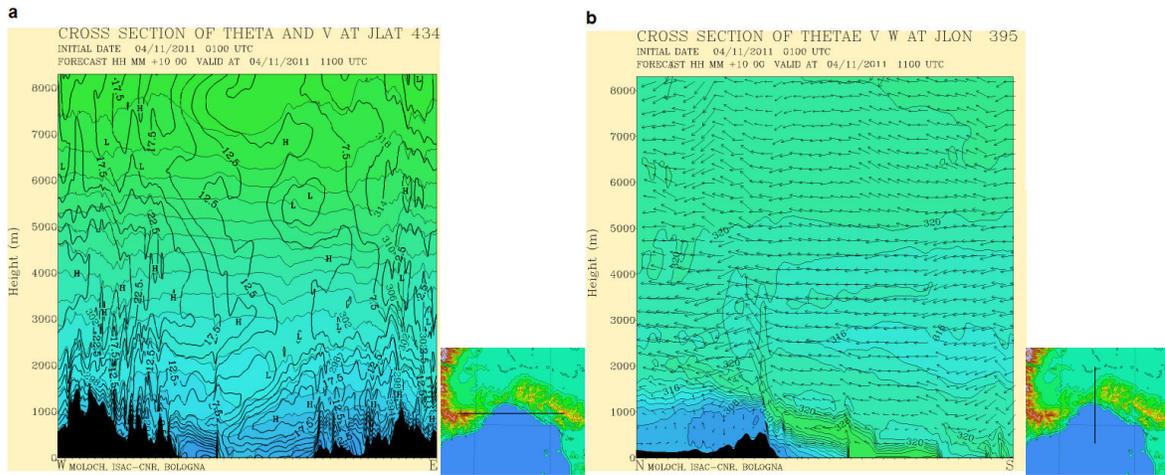


Figura 69: Mappe effettuate da MOLOCH a 1 km di passo di griglia, iniziate alle ore 01 UTC del 4 novembre (previsione a +10h), relative alle cross-sections ovest-est della stima della temperatura potenziale e del moto nel piano verticale previsti (a), e (b) nord-sud della temperatura potenziale equivalente e del moto nel piano verticale previsti.

Come nel caso delle Cinque Terre, l'evoluzione simulata da MOLOCH a 1 km di risoluzione, prima alle ore 04 UTC (Fig.70a e Fig.70b) e dopo alle ore 14 UTC (Fig.71a e Fig.71b) delle cross-sections ovest-est della temperatura potenziale equivalente e del moto nel piano verticale, lungo le linee indicate con C1 e C2, mostra come la cold pool si rafforzi nel tempo spostandosi verso est.

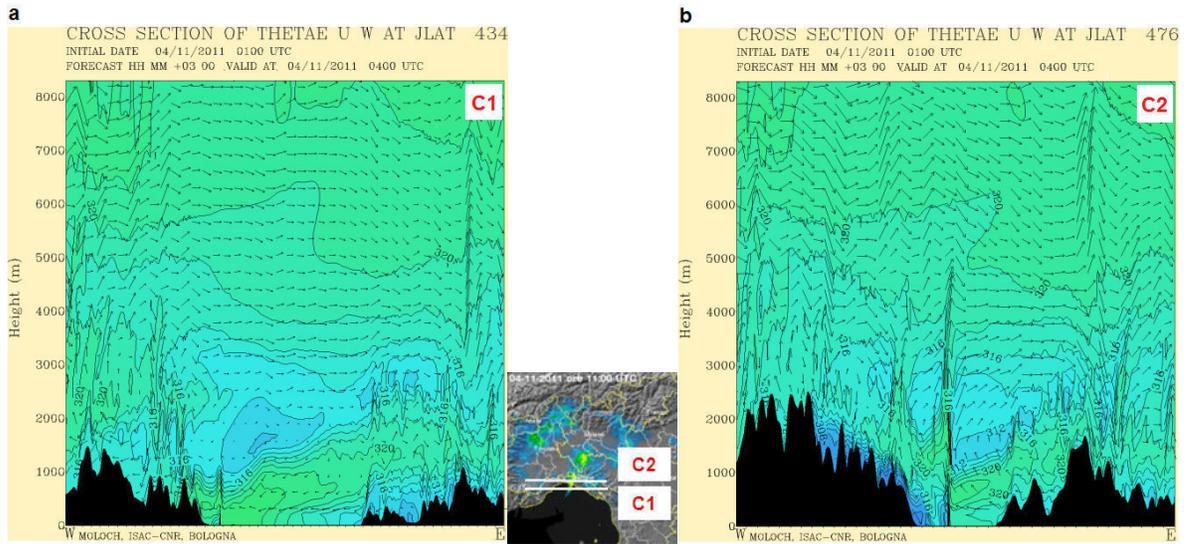


Figura 70: Mappe simulate da MOLOCH a 1 km di passo di griglia, inizializzate alle ore 01 UTC del 4 Novembre (previsione a +3h), relative alle cross-sections ovest-est per la stima della temperatura potenziale equivalente e del moto nel piano verticale lungo la linea C1 (a) e (b) la linea C2.

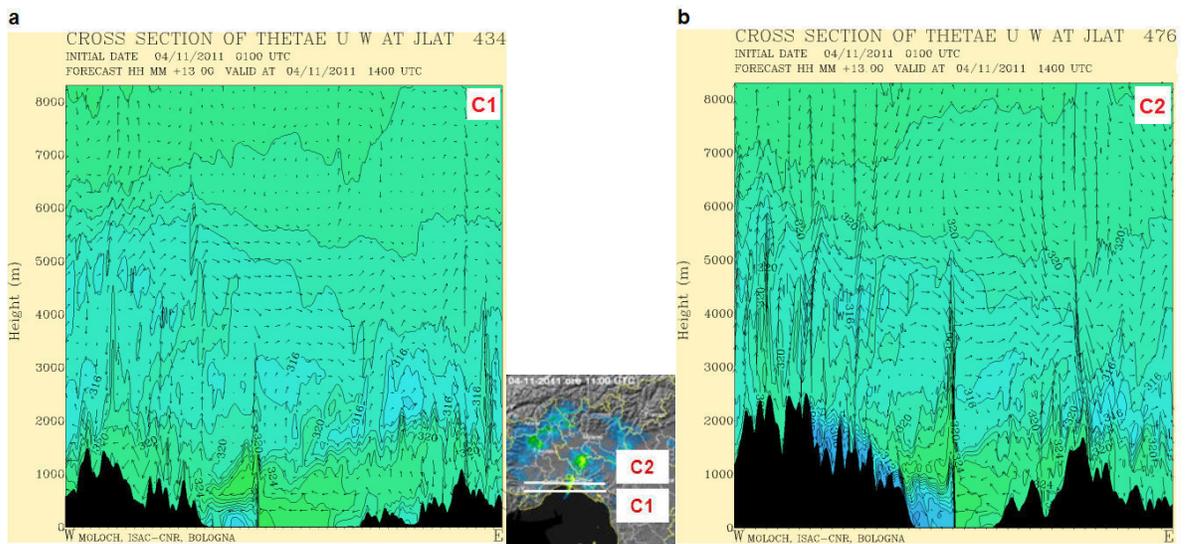


Figura 71: Mappe simulate da MOLOCH a 1 km di passo di griglia, inizializzate alle ore 01 UTC del 4 Novembre (previsione a +13h), relative alle cross-sections ovest-est per la stima della temperatura potenziale equivalente e del moto nel piano verticale lungo la linea C1 (a) e (b) la linea C2.

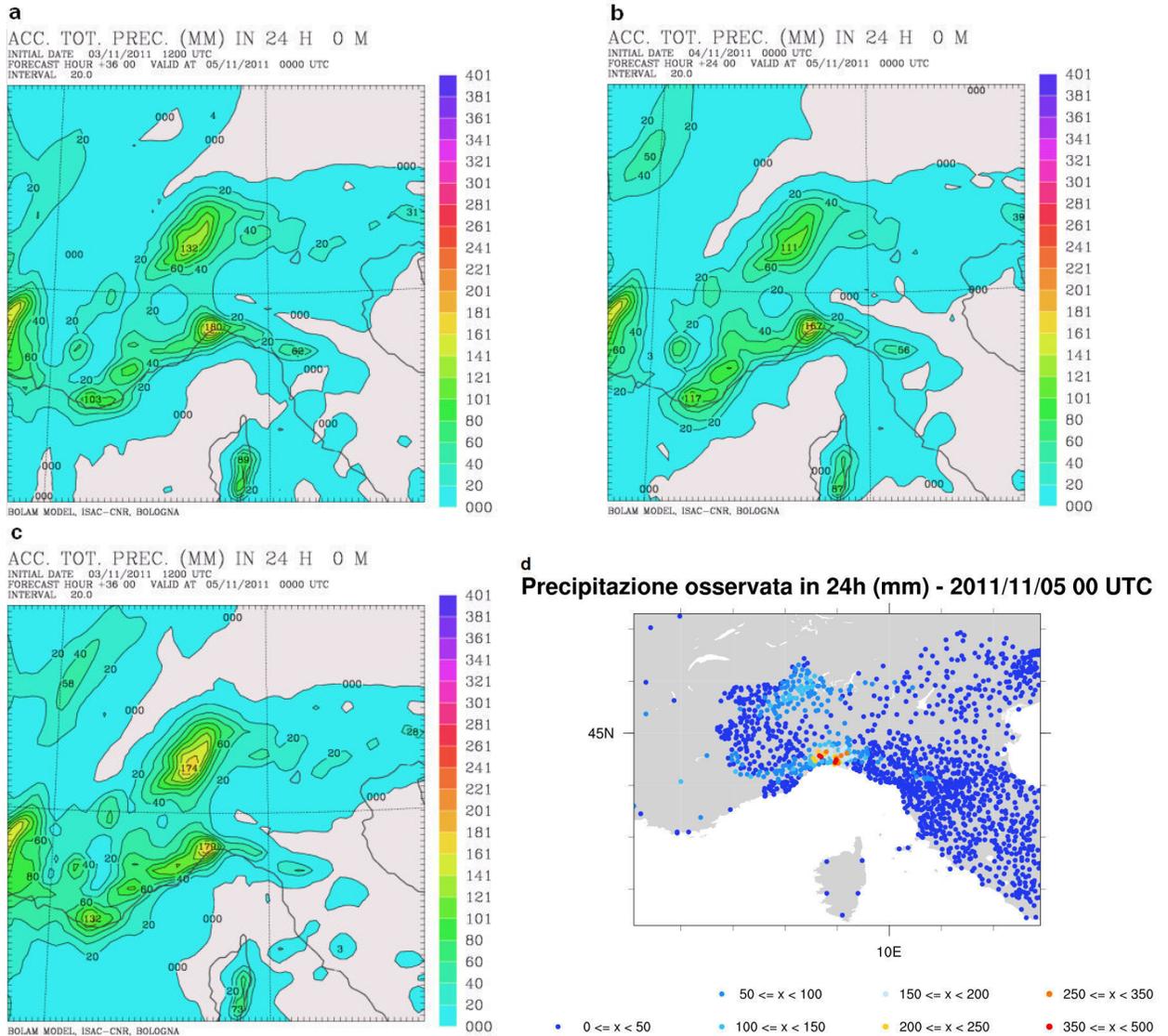


Figura 72: Mappe che mostrano la precipitazione cumulata prevista in 24h (dalle 00 UTC del 4 novembre alle 00 UTC del 5 novembre) da BOLAM10 inizializzato alle 12 UTC del 3 novembre (previsione a +36h) (a) e (b) alle 00 UTC del 4 novembre (previsione a +24h) su dati delle analisi (e successive previsioni come condizioni al contorno) NOAA, (c) inizializzato alle 12 UTC del 3 novembre (previsione a +36h) su dati delle analisi (e successive previsioni) ECMWF, e (d) mappa che mostra la cumulata osservata nello stesso intervallo di tempo (Fonte: ARPAL).

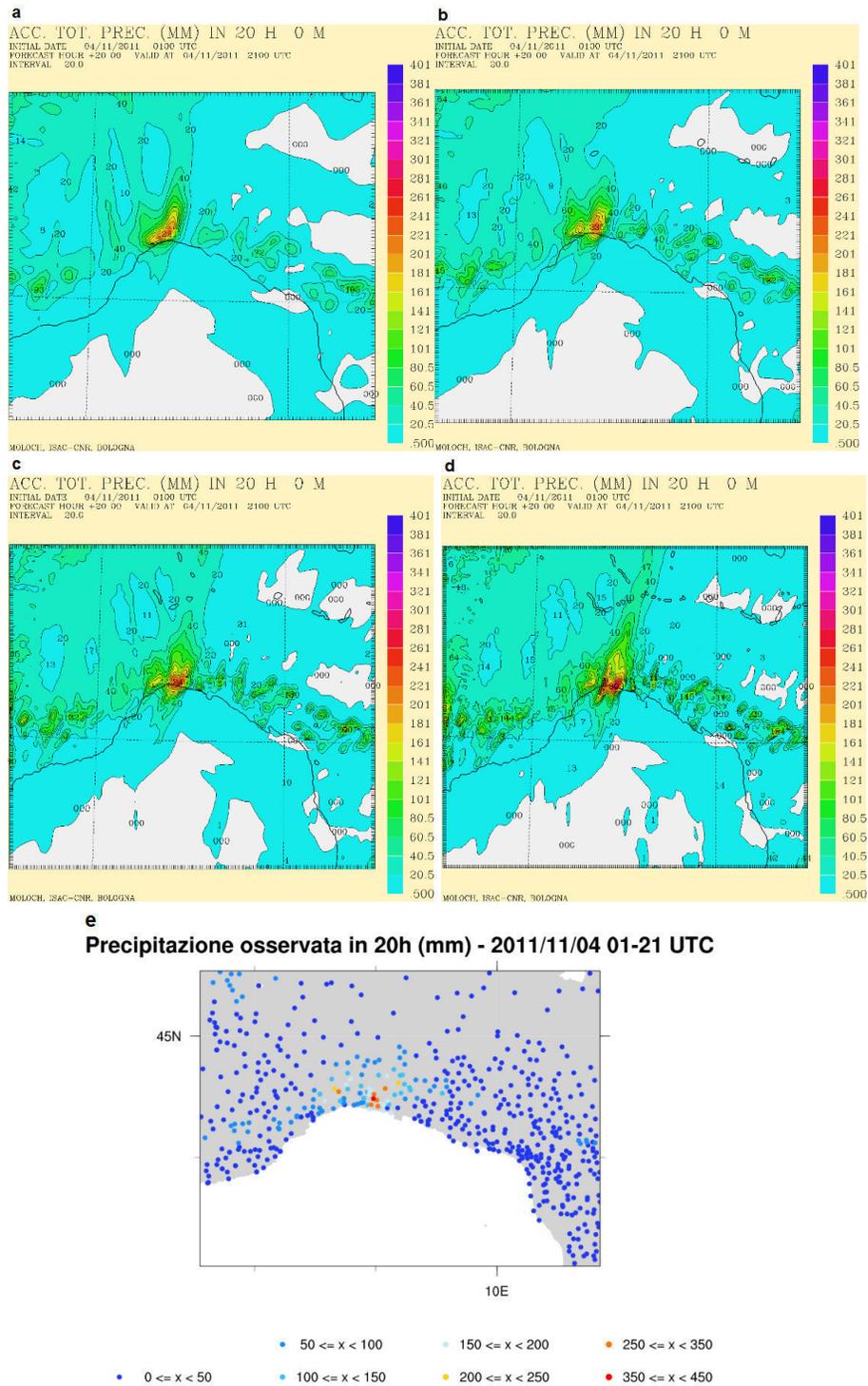


Figura 73: Mappe relative alla precipitazione cumulata prevista in Liguria in 20h (dalle 01 UTC alle 21 UTC del 4 novembre) da MOLOCH inizializzato alle 01 UTC del 4 novembre (previsione a +20h) con risoluzione orizzontale di 3 km (a), (b) di 2km, (c) di 1.5 km, e (d) di 1 km, e (e) mappa che mostra la cumulata osservata nello stesso intervallo di tempo (Fonte: ARPAL).

<b>Precipitazione cumulata in 24h – 2011/11/05 00 UTC</b>			
<b>NOAA/GFS 2011/10/24 12 UTC</b>	<b>NOAA/GFS 2011/10/25 00 UTC</b>	<b>ECMWF/IFS 2011/10/25 00 UTC</b>	<b>Osservata</b>
<b>180 mm</b>	<b>167 mm</b>	<b>179 mm</b>	<b>466 mm</b>

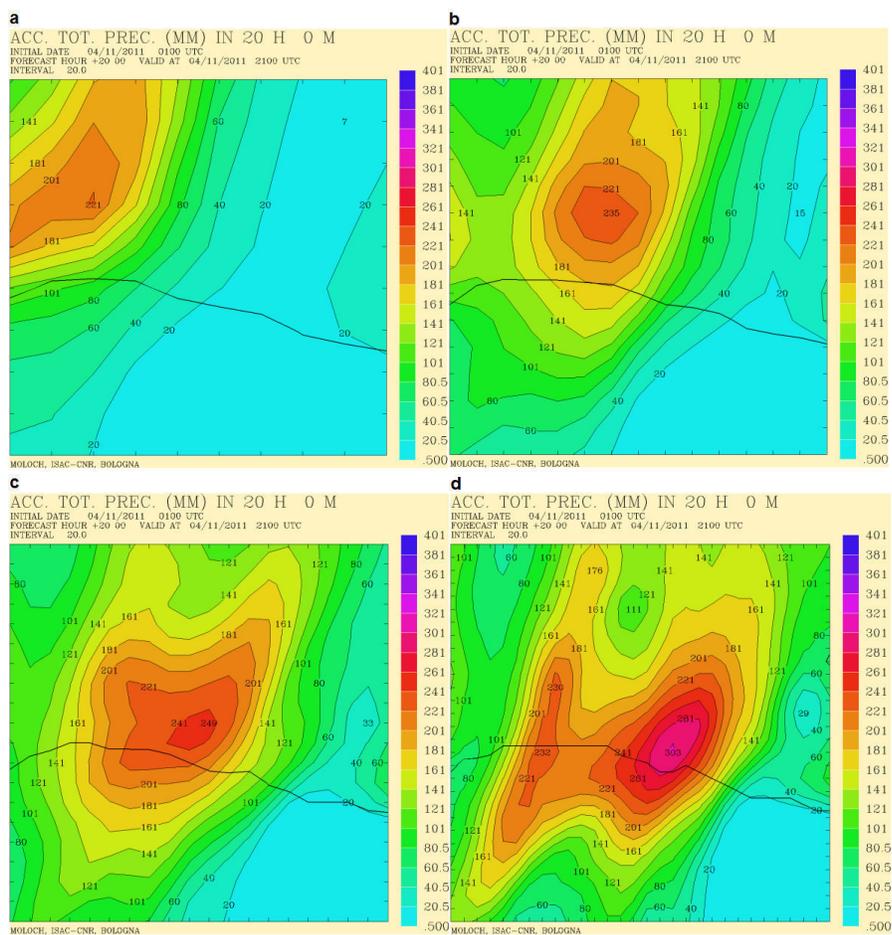
Tabella 5: Tabella riassuntiva dei valori massimi di precipitazione prevista in Liguria in 24h (dalle 00 UTC del 4 novembre alle 00 UTC del 5 novembre) da BOLAM10 al variare delle condizioni iniziali e al contorno dei due modelli globali (NOAA/GFS e ECMWF/IFS) e il valore massimo di precipitazione osservato a Vicomorasso nello stesso intervallo di tempo (Fonte: ARPAL).

<b>Precipitazione cumulata in 20h – 2011/11/04 01-21 UTC</b>				
<b>3 km</b>	<b>2 km</b>	<b>1.5 km</b>	<b>1 km</b>	<b>Osservata</b>
<b>221 mm</b>	<b>235 mm</b>	<b>249 mm</b>	<b>303 mm</b>	<b>427 mm</b>

Tabella 6: Tabella riassuntiva dei valori massimi di precipitazione prevista in Liguria in 20h (dalle 01 UTC alle 21 UTC del 4 novembre) da MOLOCH inizializzato su dati delle analisi (e successive previsioni come condizioni al contorno) NOAA al variare della risoluzione orizzontale, e il valore massimo di precipitazione osservato a Vicomorasso nello stesso intervallo di tempo (Fonte: ARPAL).

Per quanto riguarda le simulazioni di BOLAM, la diversa sensibilità della QPF alle varie condizioni iniziali e al contorno dei due modelli globali (ECMWF/IFS e NOAA/GFS) ha fornito, anche in questo caso, esiti interessanti e non molto dissimili dall'episodio delle Cinque Terre. Le simulazioni guidate del modello producono una QPF soddisfacente in prossimità delle Alpi e Prealpi centro-occidentali, e una significativa sottostima delle precipitazioni previste sul settore centrale della Liguria (Fig.72a, Fig.72b, Fig.72c) rispetto alla reale cumulata giornaliera (Fig.72d). Da segnalare anche un rilevante spostamento verso ovest (di circa 15-20 km) del massimo di precipitazione previsto rispetto all'esatta localizzazione dell'evento, indipendentemente dal tipo di inizializzazione. I dati relativi al campo di precipitazione prevista, confrontati con il valore massimo di precipitazione osservato al suolo nell'arco delle 24 ore, sono riassunti in Tab.5.

Per quanto concerne, invece, le simulazioni di MOLOCH (Fig.73 a-b-c-d-e), analizzando e confrontando gli esiti a risoluzione orizzontale differenti della precipitazione simulata in 20 ore (dalle 01 UTC alle 21 UTC), si riscontra un miglioramento della QPF all'aumentare della risoluzione (Tab.6): le migliori prestazioni vengono ottenute dal modello con risoluzione orizzontale di 1 km. Inoltre, osservando la collocazione simulata del sistema convettivo, si può notare come esso venga spostato ad est all'aumentare della risoluzione, riducendo così l'errore di posizione.



**e**  
Precipitazione osservata in 20h (mm) - 2011/11/04 01-21 UTC

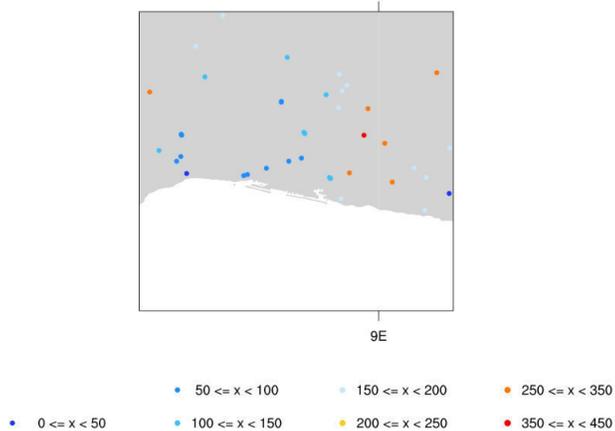


Figura 74: Mappe relative alla precipitazione cumulata media areale prevista in 20h (dalle 01 UTC alle 21 UTC del 4 novembre) da MOLOCH inizializzato alle 01 UTC del 4 novembre (previsione a +20h) con risoluzione orizzontale di 3 km (a), (b) di 2 km, (c) di 1.5 km, e (d) di 1 km, e (e) mappa relativa alla precipitazione osservata nello stesso intervallo di tempo e sulla medesima area (Fonte: ARPAL). Nel centro di ogni figura è possibile notare il tratto di costa della provincia di Genova.

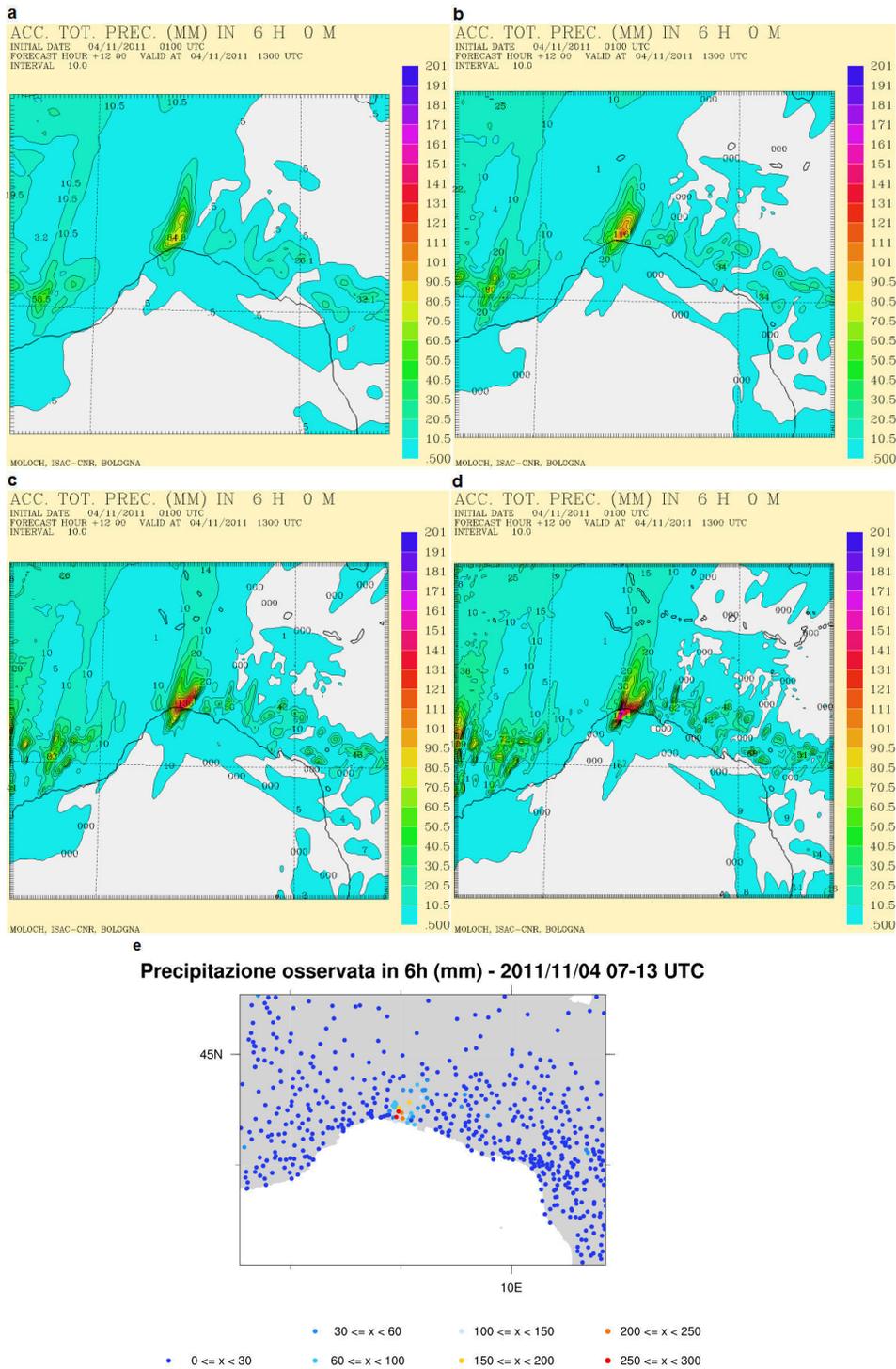


Figura 75: Mappe relative alla precipitazione cumulata prevista in Liguria in 6h (dalle 07 UTC alle 13 UTC del 4 novembre) da MOLOCH inizializzato alle 01 UTC del 4 novembre (previsione a +12h) con risoluzione orizzontale di 3 km (a), (b) di 2 km, (c) 1.5km e (d) di 1km, e (e) mappa che mostra la precipitazione cumulata osservata nello stesso intervallo di tempo (Fonte: ARPAL).

<b>Precipitazione cumulata media areale in 20h 2011/11/04 01-21 UTC</b>				
<b>3 km</b>	<b>2 km</b>	<b>1.5 km</b>	<b>1 km</b>	<b>Stimata</b>
<b>60 mm</b>	<b>87 mm</b>	<b>109 mm</b>	<b>125 mm</b>	<b>160 mm</b>

Tabella 7: Tabella riassuntiva dei valori di precipitazione cumulata media areale prevista in 20h (dalle 01 UTC alle 21 UTC del 4 novembre) da MOLOCH inizializzato su dati delle analisi (e successive previsioni come condizioni al contorno) NOAA al variare della risoluzione orizzontale e valore stimato di precipitazione cumulata media osservata sulla stessa area e nello stesso intervallo di tempo (Fonte: ARPAL).

<b>Precipitazione cumulata in 6h – 2011/11/04 07-13 UTC</b>				
<b>3 km</b>	<b>2 km</b>	<b>1.5 km</b>	<b>1 km</b>	<b>Osservata</b>
<b>85 mm</b>	<b>116 mm</b>	<b>136 mm</b>	<b>174 mm</b>	<b>293 mm</b>

Tabella 8: Tabella riassuntiva dei valori massimi di precipitazione cumulata prevista in Liguria in 6h (dalle 07 UTC alle 13 UTC del 4 novembre) da MOLOCH inizializzato su dati delle analisi (e successive previsioni come condizioni al contorno) NOAA al variare della risoluzione orizzontale, e valore massimo della precipitazione cumulata osservata nello stesso intervallo di tempo a Vicomorasso (Fonte: ARPAL).

Un'ulteriore riprova del fatto che ad un aumento della risoluzione corrisponda un miglioramento della prestazione modellistica, viene fornita dall'analisi dei dati di precipitazione a scala areale simulata ed osservata nello stesso intervallo di tempo (Tab.7).

Prendendo in considerazione un'area di  $900 \text{ km}^2$  (30 km x 30 km), nel settore centrale della Liguria, e comprendente la provincia di Genova, si ottengono i risultati mostrati in Fig.74 (a-b-c-d-e): all'aumentare della risoluzione orizzontale, oltre all'incremento della quantità di precipitazione prevista, si ha anche un miglioramento della dinamica e della localizzazione del sistema temporalesco organizzato. Focalizzando l'attenzione sulla precipitazione cumulata in 6 ore (dalle 07 UTC alle 13 UTC del 4 novembre) prevista dal modello, si nota come, anche in questo caso, le prestazioni del modello migliorino all'aumentare della risoluzione (Fig.75 a-b-c-d-e).

Per quanto riguarda l'effettiva localizzazione del sistema convettivo organizzato, ancora una volta essa viene traslata ad est all'aumentare della risoluzione: il risultato migliore viene ottenuto dalla simulazione effettuata a 1.5 km di passo di griglia.

I dati di precipitazione cumulata sul periodo considerato di 6 ore, simulati dal modello, sono riportati in Tab.8.

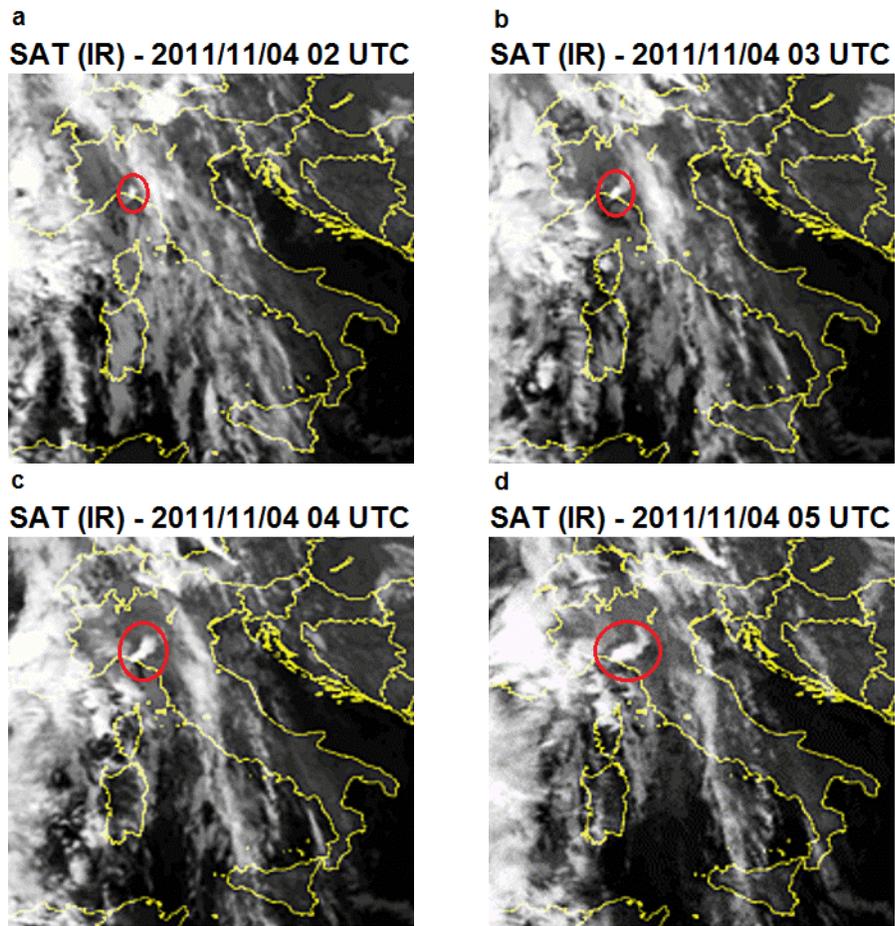


Figura 76: Immagini dal satellite MGS nell'infrarosso riferite alle ore 02 UTC (a), alle ore 03 UTC (b), alle ore 04 UTC (c), e (d) alle ore 05 UTC del 4 novembre (Fonte: [www.sat24.com](http://www.sat24.com) - Eumetsat - Met Office). In evidenza le prime celle temporalesche in formazione di fronte al promontorio di Portofino.

Tutte le simulazioni effettuate per questo evento documentano l'imprecisa prestazione del modello, sia per quanto riguarda la stima del quantitativo di precipitazione simulata che, soprattutto, dal punto di vista della determinazione della posizione del sistema convettivo: ciò può essere attribuito al fatto che le prime celle convettive, localizzate di fronte al promontorio di Portofino, hanno iniziato a formarsi e a svilupparsi nelle primissime ore del mattino, come si può vedere dalle Fig.76 (a-b-c-d). Il modello è inizializzato alle ore 01 UTC del 4 novembre e, a causa di fattori insiti al modello stesso (*spin up problem*), nelle tre ore successive non può sviluppare la convezione e poichè, appunto, le prime celle convettive si sono formate in questo intervallo di tempo, esso è risultato essere soggetto ad un errore di inizializzazione protrattosi poi durante tutto il run. A ciò va sommata, ovviamente, anche la forte caoticità/impredicibilità del sistema, amplificata in particolare durante questo tipo di eventi. Come nel caso delle Cinque Terre, infine, la sensibilità della QPF è risultata essere evidente alle diverse risoluzioni orizzontali considerate.

## 6 Conclusioni

In questa tesi si è approfondito la genesi, lo sviluppo e l'evoluzione di due eventi alluvionali liguri, avvenuti entrambi nell'autunno del 2011, effettuando analisi a scala sinottica e alla mesoscala avvalendosi dei dati osservati al suolo, in particolare di alcune variabili atmosferiche come la precipitazione, il vento e la temperatura, e utilizzando, inoltre, alcune simulazioni dei due eventi meteorologici attraverso simulazioni con modelli numerici. Per quanto riguarda l'analisi dei dati ARPAL, si sono riscontrati alcuni elementi comuni fra i due episodi:

- sono entrambi da associare al transito di una profonda saccatura sull'Europa occidentale, associata a massimi di vorticità potenziale in quota, giunta fin verso le coste del nord Africa ed alla formazione di intensi e persistenti sistema temporaleschi organizzati che, in entrambi i casi, hanno fatto registrare precipitazioni intense e cumulate molto elevate;
- la presenza di un'onda a grande scala quasi stazionaria, che favorisce in entrambi i casi la lenta propagazione dei sistemi convettivi verso est;
- il forte shear verticale e la presenza di un flusso divergente nell'alta troposfera, i quali hanno contribuito probabilmente in maniera determinante alla formazione dei sistemi convettivi responsabili delle intense precipitazioni;
- la presenza di una configurazione alla mesoscala favorevole alla formazione, in entrambi i casi, di una linea di convergenza associata al contrasto tra l'aria fredda e secca (in termini assoluti) proveniente dalla Pianura Padana e l'aria caldo-umida proveniente da sud-est;
- la quota del top delle nubi non molto elevata (circa 7-8 km);
- il gradiente di umidità specifica fra le zone a nord dell'Appennino e il Mar Ligure (circa  $0.007 \text{ kg}_v/\text{kg}$  per una distanza di circa 50 km).
- la precipitazione cumulata massima oraria osservata nei due casi (168 mm e 144 mm registrati rispettivamente nel caso di Genova e in quello delle Cinque Terre) e la cumulata totale nell'arco dell'intera giornata (539 mm e 466 mm osservati rispettivamente a Brugnato e a Vicomorasso) si possono ritenere alquanto paragonabili, tenendo in considerazione soprattutto le scale di variabilità tipiche del fenomeno.

Sono altresì da sottolineare alcuni elementi differenti che hanno caratterizzato i due eventi alluvionali in Liguria:

- la differenza di gradiente termico (maggiore di 3-4 °C / 50 km nel caso delle Cinque Terre rispetto all'episodio di Genova), pre-esistente negli strati più bassi dell'atmosfera fra le zone situate oltre Appennino (in Pianura Padana) e la costa ligure, che ha determinato l'intensità effettiva dell'outflow freddo e secco in uscita dalle valli genovesi e savonesi, contribuendo ad una diversa localizzazione delle zone di convergenza con il flusso caldo-umido da sud-est e, di conseguenza, anche dei sistemi convettivi;
- il caso delle Cinque Terre è risultato essere complessivamente più instabile sul Mar Ligure (a una certa distanza dalla costa) rispetto al caso di Genova.
- l'intensità e la stazionarietà (maggiori nel caso delle Cinque Terre) della convergenza fra i due flussi opposti, sebbene si possa solo ipotizzare questa componente dall'analisi degli esperimenti numerici, in quanto non si dispone di un quantitativo sufficiente di dati osservativi, essendo essa concentrata maggiormente sulla superficie marina;
- il sistema convettivo nel caso di Genova si è formato nelle prime ore del mattino nei pressi del promontorio di Portofino e le successive celle convettive si sono successivamente spostate verso ovest, mentre nel caso del 25 ottobre è avvenuto pressochè l'opposto poichè il sistema convettivo si è sviluppato poco più ad est di Portofino e nel corso della giornata si è poi spostato verso sud-est, interessando la zona delle Cinque Terre e rimanendo stazionario per diverse ore.
- dagli esperimenti effettuati con il modello non idrostatico MOLOCH (verificando anche diversi elementi delle simulazioni) si deduce la maggiore imprevedibilità (nella scala convettiva) del caso delle Cinque Terre rispetto all'evento di Genova.

Le simulazioni con i modelli numerici e le analisi dei dati osservati al suolo hanno fornito buoni riscontri per quanto riguarda l'esistenza di una relazione spazio-temporale tra la linea di convergenza fra i due flussi opposti e il sistema temporalesco: lungo suddetta linea si hanno maggiori probabilità di innesco e sviluppo della convezione, in particolare di quella intensa e "quasi-stazionaria" che determina i maggiori quantitativi di precipitazione.

All'inizio di questo lavoro è stata avanzata l'ipotesi che i modelli meteorologici, alle più alte risoluzioni, siano in grado di descrivere più dettagliatamente i fattori dinamici e fisici che caratterizzano l'ambiente alla mesoscala in cui si sviluppano i sistemi convettivi. In particolare l'evaporazione e/o la sublimazione della precipitazione e il conseguente rafforzamento del downdraft associato, oltre che naturalmente l'updraft legato alla condensazione, sono processi di interazione dinamica-microfisica che richiedono risoluzioni molto piccole, fino all'ordine del centinaio di metri, per essere simulati in modo realistico. Si ritiene che tali elementi siano in grado di discriminare l'evoluzione e la posizione del sistema convettivo in quanto ad esempio l'intensità della cold pool determina anche la posizione e l'intensità dell'updraft, oltre che il grado di organizzazione e la persistenza delle celle convettive.

Inoltre la dinamica del downdraft convettivo e della associata cold pool pare possa incidere sull'effettiva localizzazione della zona di convergenza presente nei bassi strati, nei casi specifici qui considerati sovrapponendosi e rafforzando l'outflow freddo proveniente dalla Pianura Padana che si oppone all'inflow caldo e umido sud-orientale che alimenta la convezione. Quest'ultima, a sua volta, tende a localizzarsi sulla linea di convergenza che demarca la separazione tra i due flussi ai bassi livelli.

Poichè si tratta di elementi operanti su scale molto piccole (dell'ordine di 1 km circa), è verosimile l'idea di ottenere prestazioni modellistiche migliori all'aumentare della risoluzione orizzontale, in particolare per quanto riguarda il rafforzamento della cold pool da parte del downdraft convettivo e relativo "feedback" positivo: il downdraft provoca il rinvigorismento della cold pool, capace di alimentare a sua volta l'updraft necessario per la persistenza e la "quasi-stazionarietà" del sistema convettivo stesso.

Limitatamente ai due casi studio considerati, gli esperimenti con i modelli numerici utilizzati, confrontati con i dati osservati, hanno complessivamente confermato tale ipotesi. Tuttavia, per poter generalizzare tali conclusioni, occorrerebbe analizzare più eventi meteorologici e, di conseguenza, elaborare e confrontare più simulazioni numeriche al fine di ottenere maggiori informazioni a riguardo.

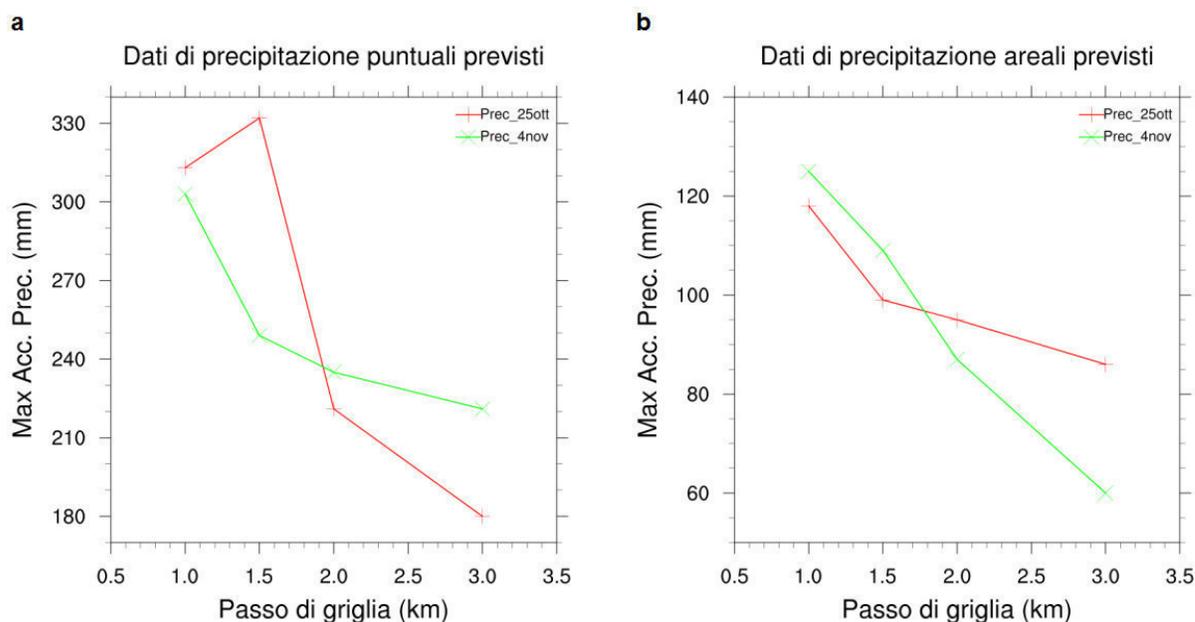


Figura 77: Grafici rappresentanti l'accumulo previsto da MOLOCH in 21h, nel caso delle Cinque Terre, e in 20h nel caso di Genova, alle varie risoluzioni orizzontali, di precipitazione puntuale massima (a), e (b) di precipitazione media areale (Fonte: ARPAL).

Per quanto riguarda l'importanza e la sensibilità alle differenti risoluzioni orizzontali da parte del modello nel simulare la convezione, è possibile affermare che, in generale, 2-3 km di passo di griglia non sembrano adeguati per ottenere con sufficiente precisione QPF e localizzazione dei massimi precipitativi, mentre a più alte risoluzioni (1-1.5 km) la precipitazione simulata aumenta avvicinandosi maggiormente ai valori osservati.

Andando maggiormente nel dettaglio ed effettuando un confronto fra i dati di precipitazione puntuali ed areali previsti dal modello MOLOCH alle diverse risoluzioni, si nota come la quantità di precipitazione prevista (sia puntuale che areale) aumenti all'aumentare della risoluzione per entrambi gli eventi considerati (Fig.77a e Fig.77b), con l'unica eccezione riguardante il caso del 25 ottobre, in cui il modello con 1.5 km di risoluzione è risultato produrre il massimo precipitativo puntuale (linea rossa di Fig.77a).

Se, invece, viene considerata la media precipitativa su un'area comprendente la zona dei fiumi Magra e Vara, il risultato migliore viene ottenuto dal modello con passo di griglia di 1 km, in quanto esso ha simulato più celle convettive ravvicinate (linea rossa di Fig.77b).

La sensibilità della QPF alle differenti risoluzioni orizzontali utilizzate si è rivelata essere maggiore nel caso delle Cinque Terre, per quanto riguarda la stima della precipitazione puntuale (Fig.77a), mentre risulta essere superiore nel caso di Genova se si considera la precipitazione cumulata media sull'area prescelta (Fig.77b).

### **Riconoscimenti**

Rivolgo i più sentiti riconoscimenti e ringraziamenti all'istituto ISAC-CNR di Bologna, presso cui, principalmente, ha avuto luogo lo svolgimento della tesi, per aver messo a disposizione dati e modelli a me necessari per la realizzazione del mio elaborato.

## Riferimenti bibliografici

- [1] Arakawa, A., and V.R. Lamb , 1977: Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation model. *Methods in Computational Physics*, **17**, Academic Press, 337.pp.
- [2] Arena, N. et al., 1998: A comparison between BOLAM3 and LILAM Limited Area Models in forecasting rain fields in case of extreme events. *MAP Newsletter*, **9**, 14-15.
- [3] Billet, S. J., and E. F. Toro, 1997: On WAF-type schemes for multi-dimensional hyperbolic conservation laws. *Journal of Computational Physics*, **130**, 1–24.
- [4] Blackadar, A. K., 1962: The Vertical Distribution of Wind and Turbulent Exchange in a Neutral Atmosphere. *J. Geophys. Res.*, **67**, 3095–3102.
- [5] Bougeault, P., and P. Lacarrere, 1989: Parameterization of Orography-Induced Turbulence in a Mesobeta–Scale Model. *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 1872–1890.
- [6] Bryan, G.H., J.C. Wyngaard, and J.M. Fritsch, 2003: Resolution requirements for the simulation of deep moist convection. *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 2394–2416.
- [7] Buongiorno Nardelli, B., C. Tronconi, and R. Santoleri, 2013: High and ultra-high resolution processing of satellite sea surface temperature data over the southern European seas in the framework of MyOcean project. *Remote Sens. Environ.*, **129**, 1–16.
- [8] Buzzi, A., M. Fantini, P. Malguzzi and F. Nerozzi, 1994: Validation of a limited area model in cases of Mediterranean cyclogenesis: surface fields and precipitation scores. *Meteorol. Atmos. Phys.*, **53**, 137-153.
- [9] Buzzi, A., and P. Malguzzi, 1997: The Bolam III model: recent improvements and results. *MAP Newsletter*, **7**, 98-99.
- [10] Buzzi, A., N. Tartaglione, and P. Malguzzi, 1998: Numerical simulations of the 1994 Piedmont flood: Role of orography and moist processes. *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 2369-2383.
- [11] Buzzi, A., and L. Foschini, 2000: Mesoscale meteorological features associated with heavy precipitation in the southern alpine region. *Meteorol. Atmos. Phys.*, **72**, 131-142.
- [12] Chao, Y., Z. Li, J. D. Farrara, and P. Huang, 2009: Blended sea surface temperatures from multiple satellites and in situ observations for coastal oceans. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **26**, 1435–1446.

- [13] Charnock, H., 1955: Wind stress on a water surface. *Quart. J. R. Met. SOC.*, **81**, 639-640.
- [14] Chen, S. H., and Y. L. Lin, 2005a: Orographic effects on a conditionally unstable flow over an idealized three-dimensional mesoscale mountain. *Meteor. Atmos. Phys.*, **88**, 1–21.
- [15] Chen, S. H., and Y. L. Lin, 2005b: Effects of moist Froude number and CAPE on a conditionally unstable flow over a mesoscale mountain ridge. *J. Atmos. Sci.*, **62**, 331–350.
- [16] Chu, C. M., and Y. L. Lin, 2000: Effects of orography on the generation and propagation of mesoscale convective systems in a two-dimensional conditionally unstable flow. *J. Atmos. Sci.*, **57**, 3817–3837.
- [17] Davolio, S., and A. Buzzi, 2004: A nudging scheme for the assimilation of precipitation data into a mesoscale model. *Weather and Forecasting*, **19**, 855-871.
- [18] Davolio, S., A. Buzzi, and P. Malguzzi, 2006: Orographic influence on deep convection: case study and sensitivity experiments. *Meteorol. Z.*, **15**, 215-223.
- [19] Davolio, S., A. Buzzi and P. Malguzzi, 2007: High resolution simulations of an intense convective precipitation event. *Meteorol. Atmos. Phys.*, **95**, N. 3-4, 139-154.
- [20] Davolio, S., A. Buzzi, and P. Malguzzi, 2009: Orographic triggering of long-lived convection in three dimensions. *Meorol. Atmos. Phys.*, **103**, 35-44.
- [21] Davolio, S., D. Mastrangelo, M.M. Miglietta, O.V. Drofa, A. Buzzi, and P. Malguzzi, 2009: High resolution simulations of a flash flood near Venice. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **9**, 1671– 1678.
- [22] Deardorff, J. W., 1980: Stratocumulus-capped mixed layers derived from a three dimensional model. *Boundary Layer Meteorol.*, **18**, 495-527.
- [23] Drofa, O. V., and P. Malguzzi, 2004: Parameterization of microphysical processes in a non hydrostatic prediction model. Proc. 14th Intern. Conf. on Clouds and Precipitation (ICCP). Bologna, 19-23 July 2004, 1297-3000.
- [24] Hohenegger, C. and C. Schär, 2007: Atmospheric predictability at synoptic versus cloud-resolving scales. *Bulletin American Meteorol. Soc.*, **88** (11), 1783-1793.

- [25] James, R.P., G.H. Bryan, and J.M. Fritsch, 2002: The effect of turbulence-resolving grid spacing on convective precipitation. Proc. Int. Conf. on Quantitative Precipitation Forecasting, Reading, UK, **65**.
- [26] Landsea, C. W., R. A. Pielke Jr., A. M. Mestas-Nunez, and J. A. Knaff, 1999: Atlantic basin hurricanes: Indices of climatic changes. *Climatic Change*, **42**, 89–129.
- [27] Laviola, S., and V. Levizzani, 2011: The 183-WSL fast rain rate retrieval algorithm. Part I: *Retrieval design. Atmos. Res.*, **99**, 443-461.
- [28] Lebeaupin, C., V. Ducrocq, and H. Giordani, 2006: Sensitivity of torrential rain events to the sea surface temperature based on high-resolution numerical forecasts. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **111**, Issue D12.
- [29] Lorenz, E.N., 1960: Energy and numerical weather prediction. *Tellus*, **12**, 364-373.
- [30] Marullo, S., B. B. Nardelli, M. Guarracino, and R. Santoleri, 2007: Observing the Mediterranean Sea from space: 21 years of Pathfinder-AVHRR sea surface temperatures (1985 to 2005): Re-analysis and validation. *Ocean Sci.*, **3**, 299–310.
- [31] Millán, M., M.J. Estrela, V. Caselles, 1995: Torrential precipitations on the Spanish east coast: The role of the Mediterranean sea surface temperature. *Atmospheric Research*, **36**, 1-16.
- [32] Mlawer, E.J., S.J. Taubman, P.D. Brown, M.J. Iacono, and S.A. Clough, 1997: Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J. Geophys. Res.*, **16**, 663-682.
- [33] Monin, A. S., and A. M. Obukhov, 1954: Basic turbulence mixing laws in the atmospheric surface layer. *Tr. Inst. Teor. Geofiz. Akad. Nauk. SSSR*, **24**, 163–187.
- [34] Morcrette, J.-J., 1991: Radiation and cloud radiative properties in the ECMWF operational weather forecast model. *J. Geophys. Res.*, **96D**, 9121-9132.
- [35] Morcrette, J.J., H. W. Barker, J. S. Cole, M. J. Iacono, and R. Pincus, 2008: Impact of a new radiation package, McRad, in the ECMWF Integrated Forecasting System. *Monthly Weather Review*, **163**, 4773-4798.
- [36] Rebora, N., et al., 2012: Extreme Rainfall in the Mediterranean: What Can We Learn from Observations?, *Journal of Hydrometeorology*, **14**.

- [37] Ritter, B., and J. F. Geleyn, 1992: A comprehensive radiation scheme for numerical weather prediction models with potential applications in climate simulations. *Mon. Wea. Rev.*, **120**, 303-325.
- [38] Stein, J., 2004: Exploration of some convective regimes over Alpine orography. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **130**, 481–502.
- [39] Trenberth, K., 2005: Uncertainty in hurricanes and global warming. *Science*, **308**, 1753–1754.
- [40] Walser, A., D. Lüthi, and C. Schär, 2004: Predictability of precipitation in a cloud-resolving model. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 560–577.
- [41] Weisman, M. L., W. C. Skamarock, and J. B. Klemp, 1997: The resolution dependence of explicitly modeled convective systems. *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 527–548.
- [42] Zampieri, M., 2004: Comparison among first, second and third order CBL model. The 6th Symposium on Boundary Layers and Turbulence. Portland, ME.
- [43] Zampieri, M., P. Malguzzi and A. Buzzi, 2005: Sensitivity of quantitative precipitation forecasts to boundary layer parameterization: a flash flood case study in the Western Mediterranean. *Natural Hazard Earth System Sci.*, **5**, 603-612.
- [44] Zipser, E. J., 1977: Mesoscale and Convective - Scale Downdrafts as Distinct Components of Squall-Line Structure. *Mon. Wea. Rev.*, **105**, 1568–1589.