



Ricerca di Sistema elettrico

# Modellistica meteo-idrologica per la valutazione e la previsione del rischio e degli impatti sulle infrastrutture del distretto urbano

Marco Verdecchia e Barbara Tomassetti

## MODELLISTICA METEO-IDROLOGICA PER LA VALUTAZIONE E LA PREVISIONE DEL RISCHIO E DEGLI IMPATTI SULLE INFRASTRUTTURE DEL DISTRETTO URBANO

Marco Verdecchia e Barbara Tomassetti  
Dipartimento di Scienze Fisiche e Chimiche - Università degli studi dell'Aquila

Settembre 2018

### Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2017

Area: Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici

Progetto: D.6 Sviluppo di un modello integrato di smart district urbano

Obiettivo: Obiettivo d: Sicurezza infrastrutture critiche e monitoraggio Smart District - Sotto-obiettivo d.1: DSS protezione e sicurezza delle infrastrutture critiche

Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Modellistica meteo-idrologica per la valutazione e la previsione del rischio e degli impatti sulle infrastrutture del distretto urbano"

Responsabile scientifico ENEA: Maurizio Pollino

Responsabile scientifico Università dell'Aquila: Marco Verdecchia

## Indice

|   |    |
|---|----|
| Sommario .....  | 5  |
| 1 Introduzione .....  | 6  |
| 2 Modellistica meteo-idrologica.....                            | 7  |
| 1.1 Le mappe di precipitazione .....                            | 8  |
| 1.2 Le mappe degli indici di allerta.....                       | 17 |
| 1.2.1 L'indice CAI .....  | 18 |
| 1.2.2 L'indice BDD.....   | 20 |
| 2 Caso di studio: allerta per i siti critici di ACEA-Areti..... | 22 |
| 3 Conclusioni .....   | 35 |
| 4 Riferimenti bibliografici .....                               | 36 |
| 5 Abbreviazioni ed acronimi .....                               | 37 |
| 6 Curriculum scientifico dei partecipanti .....                 | 38 |

## Indice delle figure

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. Tempo medio di corrivazione calcolato per il dominio geografico considerato. Il tempo medio di corrivazione rappresenta il tempo che una porzione d’acqua impiega mediamente per arrivare alla foce del fiume scorrendo superficialmente attraverso la rete drenante del bacino stesso. ....  | 8  |
| Figura 2. Un esempio della sequenza delle mappe di: a) precipitazione; b) sorgenti di dati; c) BDD ( <i>Best Discharge-based Drainage alarm index</i> ); d) CAI ( <i>CHyM Alarm Index</i> ).Tutte le mappe vengono operativamente aggiornate ogni mattina ed integrate nella Piattaforma DSS CIPCast. La sequenza consente una visione sinottica ed immediata degli eventi meteorici attesi nelle ore successive..... | 12 |
| Figura 3. Visualizzazione integrata della mappa di precipitazioni previste (valori in mm/h) e dell’indice BDD nel contesto dell’interfaccia WebGIS della Piattaforma DSS CIPCast .....  | 13 |
| Figura 4. Ricostruzione schematica di come il modello CHyM utilizza le diverse sorgenti di dati per ricostruire il campo di precipitazione. Il sistema modulare assimila una sorgente di dati alla volta. ....  | 15 |
| Figura 5. Un esempio della sequenza delle mappe delle sorgenti di dati utilizzate per la ricostruzione del campo di precipitazione; i falsi colori indicano le diverse sorgenti.....  | 16 |
| Figura 6. Un esempio di mappa del CAI index per l’evento che ha investito il bacino del Tevere nel dicembre del 2008 e che ha causato molte criticità dal punto di vista idrologico. ....   | 19 |
| Figura 7. Un esempio di mappe del <i>BDD index</i> per l’evento che ha investito il bacino del Tevere nel dicembre del 2008 e che ha causato molte criticità dal punto di vista idrologico.....   | 21 |
| Figura 8. L’individuazione del “closest channel” per ogni cabina principale di Areti. La terza e la quarta riga della tabella indicano, per ogni sito ove si trova la cabina principale di Areti, la distanza in km dalla prima cella-canale simulata da CHyM ed il valore (in Km <sup>2</sup> ) dell’area drenata da tale cella. ....  | 22 |
| Figura 9. Visualizzazione integrata della mappa di BDD index e della localizzazione delle Cabine Primarie della rete MT di Areti per il caso studio dell’11-12 dicembre 2008. ....  | 24 |
| Figura 10. Visualizzazione integrata della mappa di CAI index e della localizzazione delle Cabine Primarie della rete MT di Areti per il caso studio dell’11-12 dicembre 2008. ....   | 24 |
| Figura 11. Sequenza delle mappe di precipitazione per il caso studio del 5-6 dicembre 2008. ....  | 25 |
| Figura 12. Sequenza delle mappe di precipitazione per il caso studio dell’11-12 dicembre 2008 .....   | 26 |
| Figura 13. Sequenza delle mappe di BDD index per il caso studio del 5-6 dicembre 2008. ....   | 27 |
| Figura 14. Sequenza delle mappe di BDD index per il caso studio dell’11-12 dicembre 2008 .....  | 28 |
| Figura 15. Sequenza delle mappe di CAI index per il caso studio del 5-6 dicembre 2008. ....   | 29 |
| Figura 16. Sequenza delle mappe di CAI index per il caso studio dell’11-12 dicembre 2008.....   | 30 |
| Figura 17. Tabella completa del BDD index per il caso studio del 5-6 dicembre 2008 in riferimento agli elementi critici (Cabine Primarie) della rete di distribuzione ACEA-Areti.....   | 31 |
| Figura 18. Tabella completa del BDD index per il caso studio dell’11-12 dicembre 2008 in riferimento agli elementi critici (Cabine Primarie) della rete di distribuzione ACEA-Areti.....  | 32 |
| Figura 19. Tabella completa del CAI index per il caso studio del 5-6 dicembre 2008 in riferimento agli elementi critici (Cabine Primarie) della rete di distribuzione ACEA-Areti.....   | 33 |
| Figura 20. Tabella completa del CAI index per il caso studio dell’11-12 dicembre 2008 in riferimento agli elementi critici (Cabine Primarie) della rete di distribuzione ACEA-Areti.....  | 34 |

## Sommario

Le attività svolte nell'ambito dell'Accordo di Collaborazione relativo al presente Piano Annuale di Realizzazione (PAR2017), si sono incentrate prevalentemente sullo sviluppo di tools operativi per la visualizzazione delle previsioni idrologiche e sulla "specializzazione" di queste previsioni al fine di supportare la prevenzione e la gestione dei guasti sul sistema di distribuzione della rete elettrica.

Più specificatamente il sistema prevede lo sviluppo e l'aggiornamento operativo su piattaforma web di due tipi di prodotti: il primo essenzialmente basato sulla mappatura degli indici di allarme, consente di avere una visione di insieme sugli eventi meteorologici ed idrologici attesi sul bacino del Tevere e sui bacini limitrofi, e più specificatamente sugli effetti al suolo che questi eventi possono comportare. La seconda tipologia di prodotti è costruita specializzando gli indici di allarme idrologico ad un insieme di specifici siti che Areti (il ramo di azienda del gruppo ACEA Spa, che gestisce la distribuzione elettrica nell'area di Roma) ritiene di interesse strategico per la robustezza delle rete elettrica e per la continuità dei servizi. Per ognuno di questi siti, viene individuato, sulla base di un algoritmo in fase avanzata di calibrazione, il segmento della rete drenante il cui stress può risultare maggiormente critico per la struttura elettrica in questione. Il risultato di questo secondo prodotto viene sintetizzato in una tabella che riporta, per ognuno dei siti indicati da Areti, la sequenza temporale degli indici di allarme, con un sistema di colori che evidenzia le ore ed i siti ove ci si aspetta, eventualmente, una situazione di criticità.

I livelli di allerta per gli indici di allarme idrologico sono stati stabiliti sulla base della simulazione di eventi severi che hanno interessato il Lazio e la zona di Roma in particolare. A tale proposito una ricostruzione dettagliata, con relativa simulazione della previsione operativa, è stata effettuata per gli eventi che hanno interessato la Capitale ed il suoi dintorni nel dicembre del 2008: di questo particolare caso-studio vengono riportati e discussi vari dettagli nel presente Report.

I risultati mostrano come il sistema sviluppato sarebbe stato effettivamente in grado di generare un'efficace allerta con almeno un giorno di anticipo ed evidenziare i segmenti della rete drenante e le zone degli impianti della rete elettrica che sono stati soggetti a situazioni di stress.

## 1 Introduzione

Le attività operative che si sono sviluppate nell'ambito del presente Accordo di Collaborazione e inserite nel Subtask d.1 del Progetto D.6 si sono svolte in continuità con quanto definito e sviluppato nel corso dei precedenti Piani Annuali di Realizzazione (PAR2015, cfr. Report RdS/PAR2015/022; PAR2016, cfr. Report RdS/PAR2016/022).

Esse si basano essenzialmente sulle simulazioni effettuate con il modello CHyM<sup>1</sup> (*Cetemps HYdrological Model*) e si sono incentrate prevalentemente sullo sviluppo di *tools* operativi per la visualizzazione delle previsioni idrologiche e sulla "specializzazione" di queste previsioni al fine di supportare la valutazione e la previsione del rischio e degli impatti sulle infrastrutture del sistema di distribuzione della rete elettrica nel distretto urbano di interesse.

Nello specifico, sono state implementate le funzionalità (automatiche) di aggiornamento operativo e di mappatura sulla Piattaforma CIPCast dei due indici di allarme BDD (*Best Discharge-based Drainage alarm index*) e CAI (*CHyM Alarm Index*), in modo da avere una visione di insieme sugli eventi meteorologici attesi sul bacino del Tevere e sui bacini limitrofi, e più specificatamente dei loro effetti.

Come caso di studio applicativo, i summenzionati indici di allarme idrologico sono stati "specializzati" per fornire informazioni relative ad un insieme di specifici siti che il gestore della rete di distribuzione elettrica Areti ha indicato di proprio interesse strategico, ai fini dell'operatività della rete e della continuità di servizio (in particolare, sono state selezionate le Cabine Primarie, CP, della rete a media tensione, MT). Per ogni CP è stata individuata la porzione drenante del reticolo idrografico il cui stress può risultare maggiormente critico per l'elemento in questione. Il risultato è sintetizzato in uno strato informativo che riporta, per ogni CP, la sequenza temporale degli indici di allarme ed, eventualmente, una situazione di criticità.

I livelli di allerta per gli indici di allarme idrologico sono stati stabiliti sulla base della simulazione di eventi severi che si sono verificati in anni recenti e hanno interessato il Lazio e la zona di Roma in particolare. A tal fine, sono stati individuati e definiti una serie di eventi storici critici da utilizzare come riferimento per la messa a punto dell'approccio: tali eventi hanno rappresentato i casi di studio analizzati e sono stati concordati e individuati con il supporto di Areti.

In particolare, una ricostruzione dettagliata, con relativa simulazione della previsione operativa, è stata effettuata per una serie di eventi (precipitazioni ed alluvioni) che hanno interessato la Capitale ed i suoi dintorni nella prima decade del dicembre del 2008 (5-6 dicembre e 11-12 dicembre). I risultati di tale simulazione hanno mostrato come il sistema CIPCast (grazie ai dati provenienti dal modello CHyM), se operante al tempo dell'evento pregresso, sarebbe stato effettivamente in grado di generare un'efficace allerta con almeno un giorno di anticipo ed evidenziare i segmenti della rete drenante e le zone degli elementi della rete elettrica che sono stati realmente soggetti a situazioni di stress o criticità.

---

<sup>1</sup> <http://cetemps.aquila.infn.it/chym/>

## 2 Modellistica meteo-idrologica

Uno degli obiettivi principali del Subtask d.1, in cui si inserisce la presente collaborazione, consiste nello sviluppo di una Piattaforma DSS operativa (CIPCast) che consenta di fornire informazioni su situazioni di allarme derivanti da eventi meteorologici severi. A questo scopo sono stati adottati due approcci, integrati tra loro, attraverso cui sono resi disponibili due distinti prodotti.

Il primo si basa sulla ricostruzione dei campi di precipitazione previsti ed osservati a partire da differenti sorgenti di dati; la ricostruzione dello scenario di pioggia viene fatto con risoluzione oraria e su un reticolo regolare che comprende tutto il Centro Italia ed include l'intero bacino del Tevere. Al fine di ottenere la migliore stima possibile della precipitazione si utilizzano, per ogni step orario di tempo, differenti sorgenti di dati, nell'ordine: i) osservazioni a terra, ii) stime radar, iii) stime da satellite e iv) simulazioni con modelli meteorologici. I differenti dati vengono quindi assimilati ed interpolati su una griglia spaziale, utilizzando un ordine gerarchico che dipende dalla affidabilità del dato stesso; si cerca quindi di "riempire" la maggior area possibile utilizzando i dati pluviometrici, dove questo non è possibile si usano i dati radar e così via.

La seconda classe di prodotti che vengono resi disponibili si basa sulla predizione esplicita della portata: quest'ultima viene stimata con un modello fisico che simula dettagliatamente il ciclo idrologico a partire dalla mappe di precipitazione.

A parte le incertezze, che sono intrinseche ai metodi numerici che si utilizzano per la predizione dei campi meteorologici e quindi della portata dei fiumi, una delle maggiori criticità affrontate è consistita nel rendere le suddette previsioni fruibili ed integrabili nel DSS. Quindi, per superare le suddette difficoltà, è stato proposto l'utilizzo di indici appositamente studiati che, seppur dedotti dai campi fisici previsti, possono consentire una immediata valutazione del rischio e della relativa localizzazione spaziale e temporale dello stesso. Il sistema deve consentire di fornire messaggi di allarme sia sulla base delle precipitazioni osservate e previste, sia sulla base della previsione delle portate del Tevere e dei suoi principali affluenti.

A questo scopo, la collaborazione ha previsto l'utilizzo del modello idrologico CHyM, sviluppato presso il CETEMPS<sup>2</sup> dell'Università dell'Aquila e lungamente testato con simulazioni a diverse scale sia spaziali che temporali.

Il modello CHyM si presta particolarmente a questo tipo di applicazioni per due sue caratteristiche peculiari. In primo luogo l'architettura del modello consente di assimilare, durante l'integrazione, differenti sorgenti di dati che vengono aggregati sulla griglia del modello secondo uno schema gerarchico che dipende dalla affidabilità dei vari data-sets. Questa caratteristica permette di utilizzare il modello per prevedere, in modalità operativa, gli scenari di precipitazione con la maggior precisione possibile, adattando l'algoritmo ai dati effettivamente disponibili per ogni ora di integrazione (cfr. Report RdS/PAR2015/022 e Report RdS/PAR2016/022).

L'altra caratteristica del modello (come già descritto in dettaglio nel Report RdS/PAR2016/022) è la possibilità di prevedere la portata di un arbitrario bacino idrologico, utilizzando un dettagliato schema di parametrizzazione dei diversi fenomeni fisici che contribuiscono al ciclo idrologico ed utilizzando, il campo di precipitazione ricostruito secondo le modalità in precedenza descritte.

Nei seguenti Paragrafi sarà fornita una descrizione dettagliata delle metodologie ed approcci perseguiti nel corso delle attività della presente collaborazione e dei risultati ottenuti.

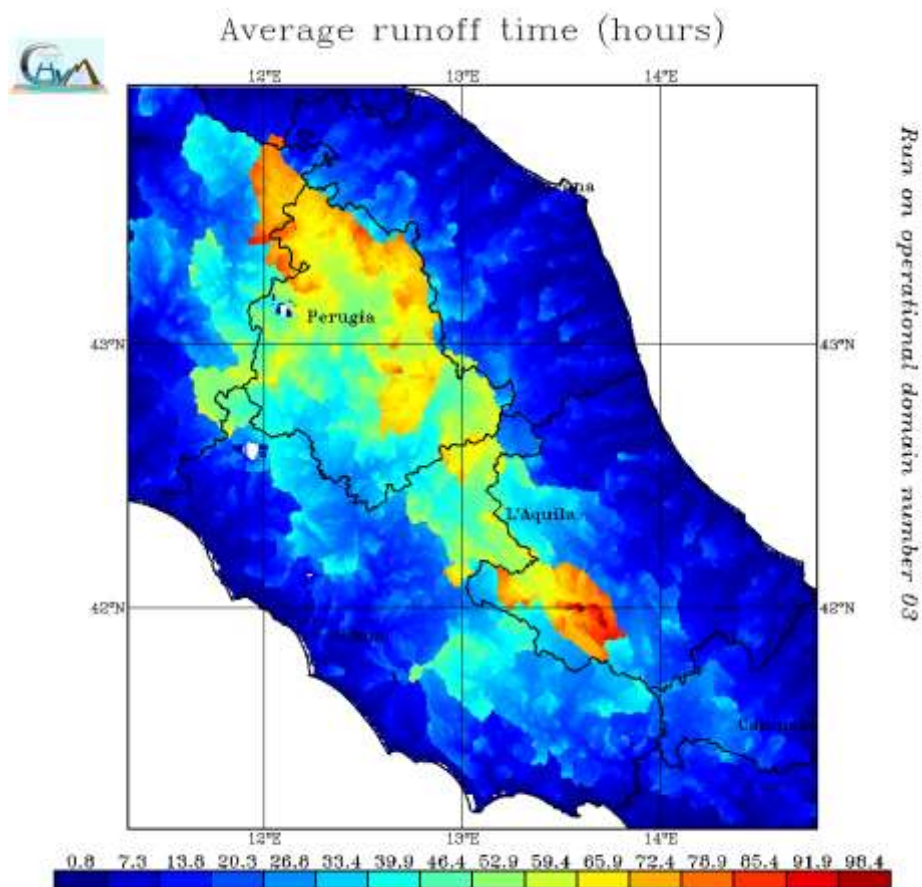
---

<sup>2</sup> CETEMPS, Center of Excellence Telesensing of Environment and Model Prediction of Severe events: <http://cetemps.aquila.infn.it/>

### 1.1 Le mappe di precipitazione

CHyM è un modello a parametri distribuiti in cui tutte le grandezze che caratterizzano il ciclo idrologico sono definite su una griglia regolare, la cui risoluzione dipende dalla specifica applicazione; in particolare la risoluzione orizzontale deve essere non troppo piccola rispetto alle dimensioni trasversali del più grande fiume che si vuole simulare.

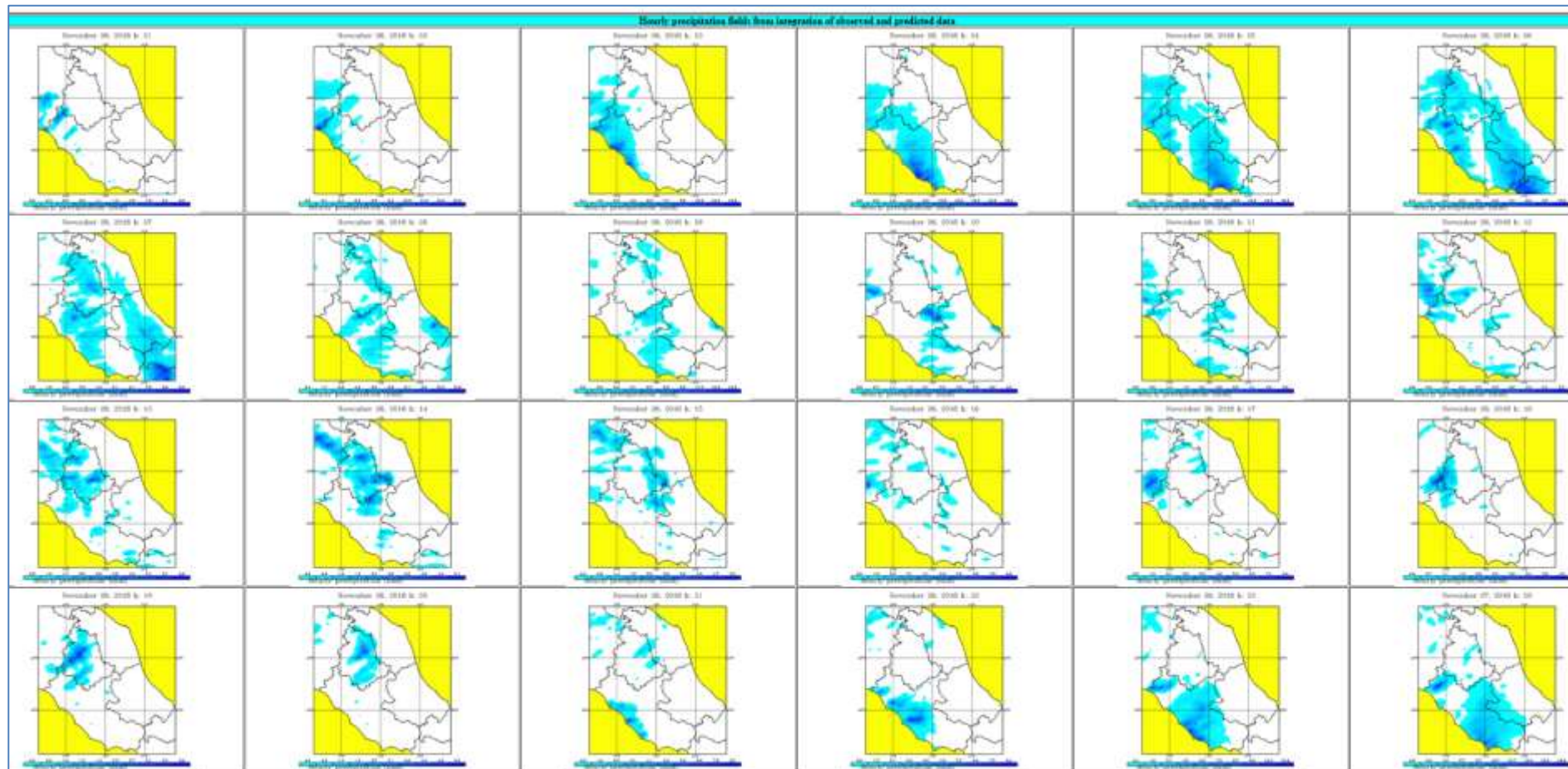
Per il bacino del Tevere, nelle simulazioni di cui qui trattiamo, abbiamo utilizzato una risoluzione orizzontale di circa 585 metri. Il dominio geografico simulato è nel range 41.16-43.97 di Latitudine Nord e 11.31-14.79 di Longitudine Est: la griglia è quindi costituita da un reticolo di 581 x 472 punti.



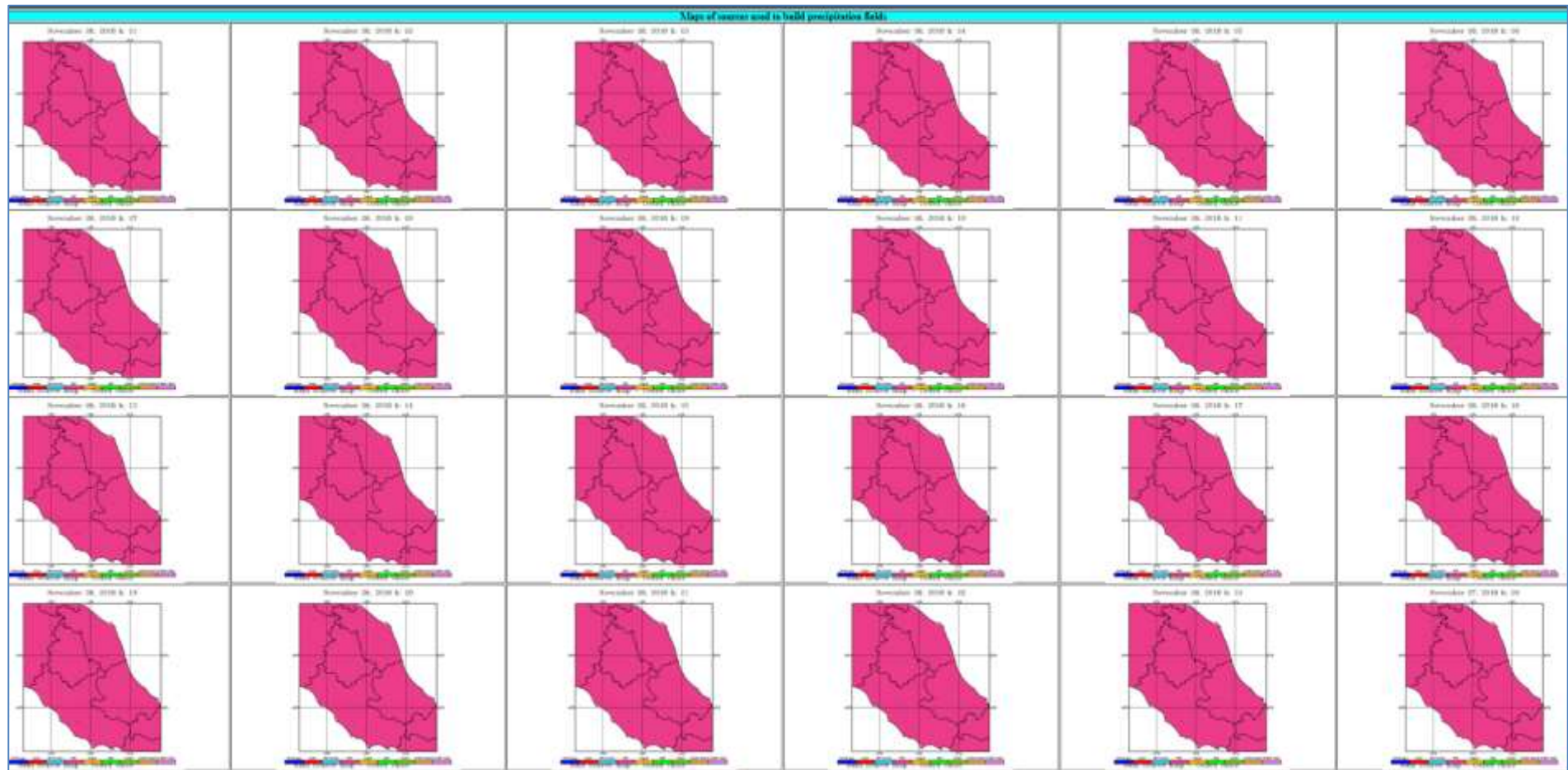
**Figura 1. Tempo medio di corrivazione calcolato per il dominio geografico considerato. Il tempo medio di corrivazione rappresenta il tempo che una porzione d'acqua impiega mediamente per arrivare alla foce del fiume scorrendo superficialmente attraverso la rete drenante del bacino stesso.**

Le simulazioni operative vengono effettuate ogni giorno all'incirca alle ore 4 locali, in maniera da rendere disponibili tutti gli output numerici e grafici già nelle prime ore del mattino. Queste simulazioni coprono un arco temporale che va da 96 ore prima del momento in cui si effettua la simulazione fino alle 24 ore successive; l'arco di tempo pregresso serve ad assicurare che l'intero ciclo di runoff sia correttamente riprodotto per l'intero bacino principale del Tevere. In particolare, come si vede dalla Figura 1, il tempo massimo di corrivazione per questo bacino è appunto di 4 giorni; il tempo di corrivazione è definito come l'intervallo temporale mediamente impiegato da una certa quantità di acqua per arrivare alla foce scorrendo superficialmente attraverso la rete drenante del bacino.

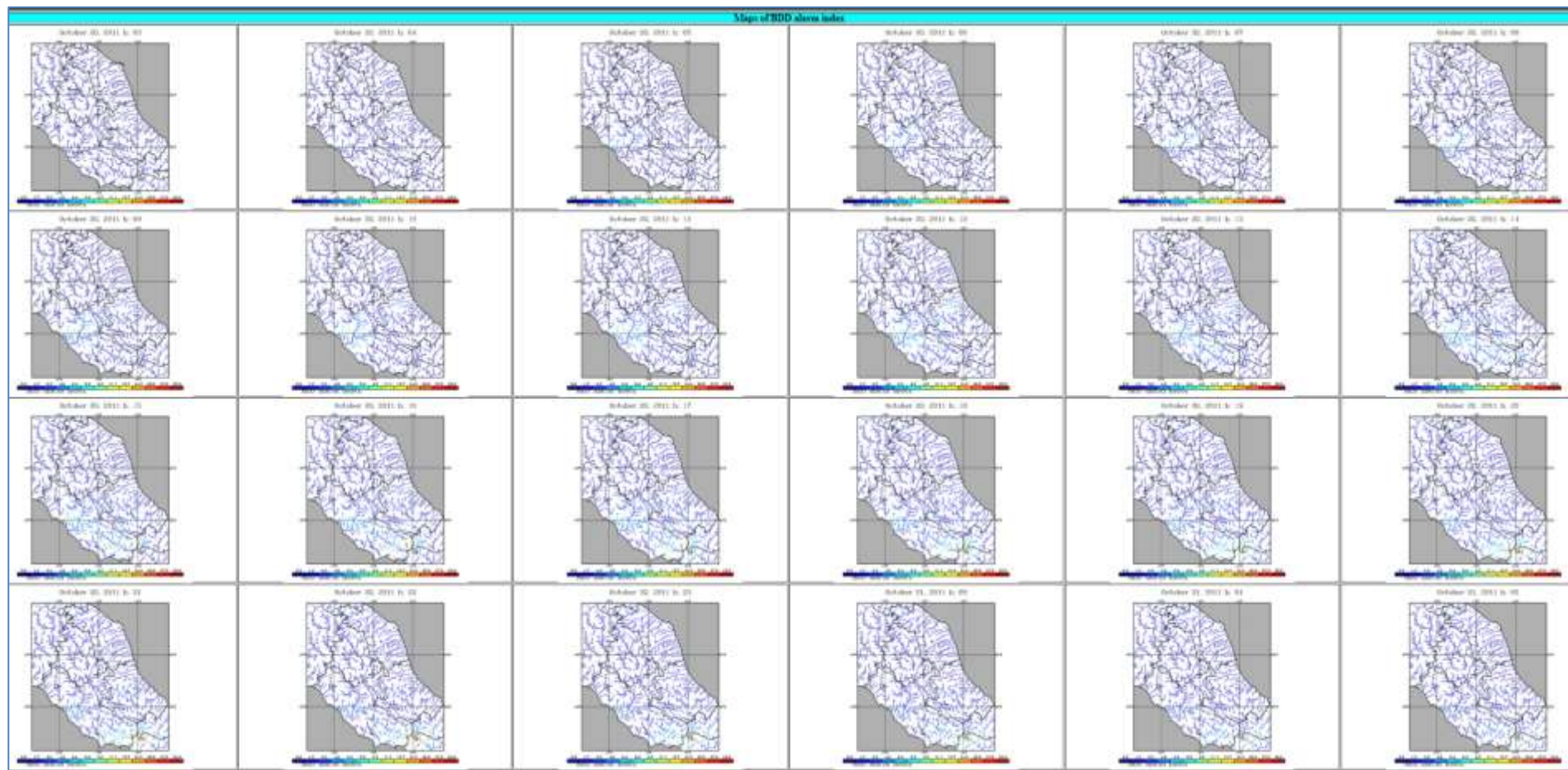




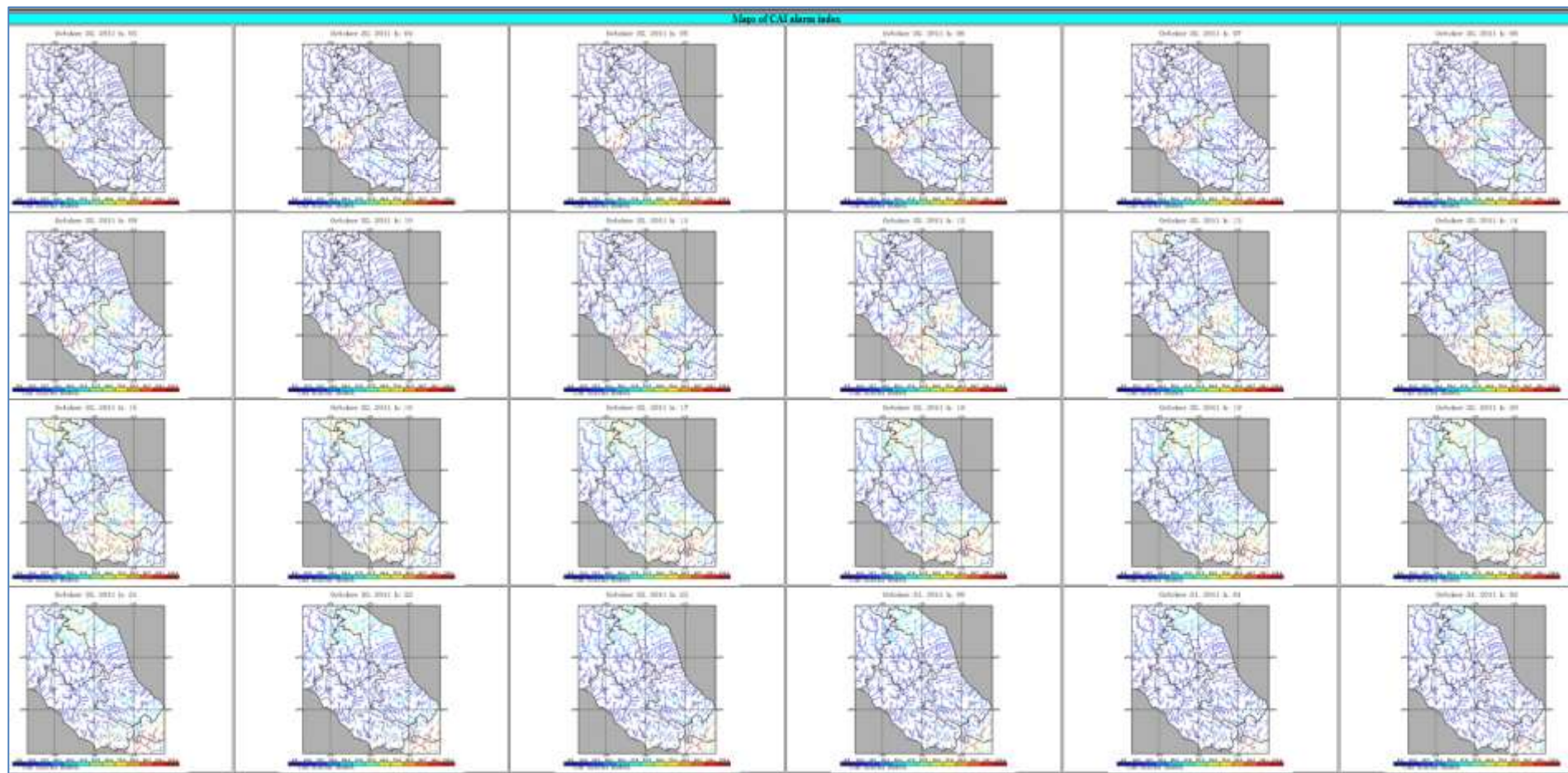
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 2. Un esempio della sequenza delle mappe di: a) precipitazione; b) sorgenti di dati; c) BDD (*Best Discharge-based Drainage alarm index*); d) CAI (*CHyM Alarm Index*). Tutte le mappe vengono operativamente aggiornate ogni mattina ed integrate nella Piattaforma DSS CIPCast. La sequenza consente una visione sinottica ed immediata degli eventi meteorici attesi nelle ore successive.

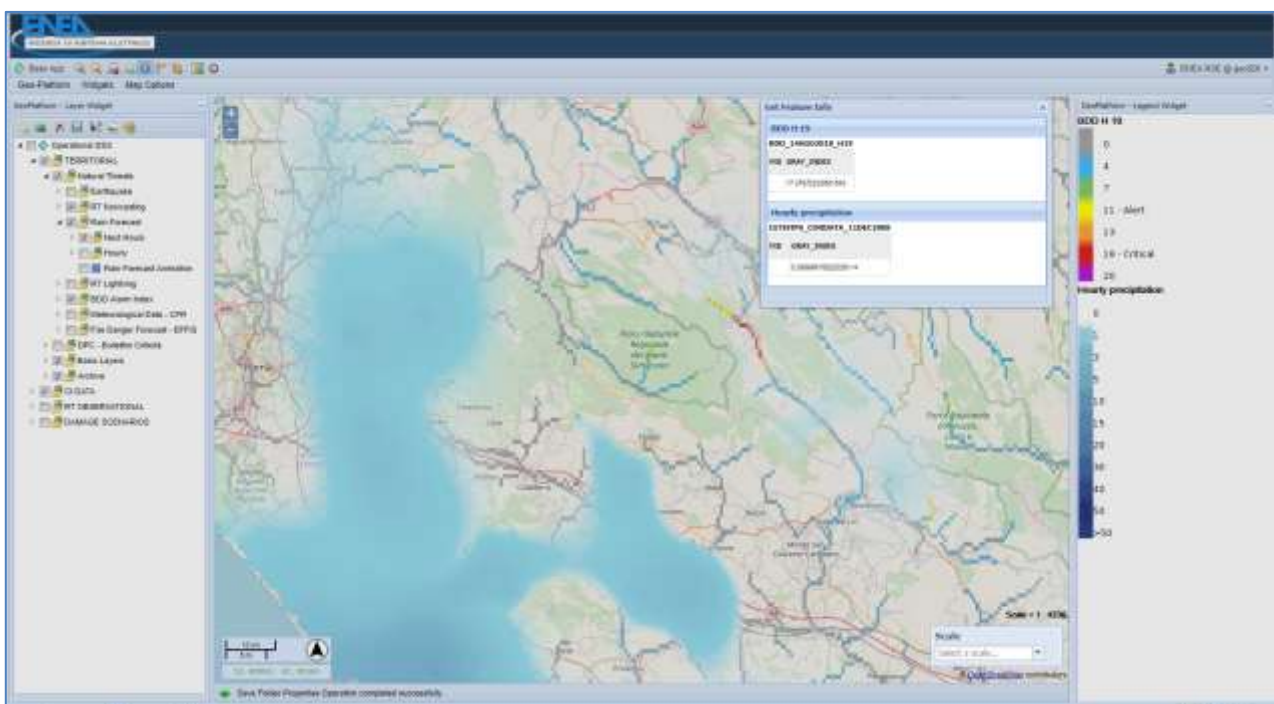
I risultati delle simulazioni vengono quindi resi disponibili in forma sia grafica che numerica su una pagina web dedicata al progetto (Figura 2) ed accessibile al seguente URL:

<http://cetemps.aquila.infn.it/chym/rse/>

La pagina web contiene all'inizio i link alle tabelle dove vengono mostrate le sequenze temporali degli indici di allarme (di cui si discute nel Paragrafo 1.2 di questo documento) ed è quindi divisa in quattro sezioni dove vengono mostrate le sequenze dei campi di precipitazione (Figura 2-a), indici di allarme (Figura 2-c e Figura 2d) ed il dettaglio delle sorgenti di dati che sono state utilizzate per la ricostruzione del campo di precipitazione (Figura 2-b).

La precipitazione viene visualizzata come sequenza di 24 mappe che coprono, con risoluzione temporale oraria, l'arco dell'intera giornata "corrente" a partire dalla mezzanotte; la sequenza, di cui un esempio è riportato nella Figura 2-a, consente una visione sinottica ed immediata degli eventi meteorici attesi nelle ore successive.

Al fine di agevolare la consultazione ed evitare la necessità di restringimenti di accesso o forme di protezione tramite password, la pagina consente di accedere solo al materiale grafico, ed ai file in formato NetCDF<sup>3</sup>. Questi stessi file, quindi, sono acquisiti automaticamente da ENEA per essere inseriti (altrettanto automaticamente) all'interno della Piattaforma DSS ed essere visualizzabili e fruibili mediante l'interfaccia WebGIS di CIPCast (Figura 3).



**Figura 3. Visualizzazione integrata della mappa di precipitazioni previste (valori in mm/h) e dell'indice BDD nel contesto dell'interfaccia WebGIS della Piattaforma DSS CIPCast**

<sup>3</sup> NetCDF (Network Common Data Form): <https://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/>

La ricostruzione della precipitazione sul dominio simulato avviene, durante l'integrazione del modello CHyM, utilizzando diverse fonti di dati, integrate in maniera gerarchica, a seconda la loro "affidabilità". Ad esempio, i dati rilevati dalla rete idrometrica vengono utilizzati in maniera prioritaria essendo misure puntuali, stimabili come le più affidabili; in assenza di misure pluviometriche parte del sottodominio viene "riempito" utilizzando stime di precipitazione da segnali radar o da misure satellitari.

Infine nelle zone non ancora coperte, la precipitazione viene completata con i dati previsti dai modelli meteo operativi presso il CETEMPS dell'Università dell'Aquila, in particolare MM5<sup>4</sup> e WRF<sup>5</sup>. E' ovvio che, per gli step di tempo "futuri", rispetto al momento in cui si effettua la simulazione, si possono utilizzare solo dati da modello.

CHyM utilizza, per l'integrazione dei dati di pioggia, una serie di algoritmi complessi ed implementati in maniera nativa nel codice del modello; questi algoritmi si basano sulla teoria dei cosiddetti "Automati Cellulari" (Packard & Wolfram, 1985).

Diamo qui una breve sintesi dei concetti che sono alla base della teoria e soprattutto dettagli sulla applicazione della per le applicazioni di cui qui si discute.

Un sistema di automi cellulari (Packard & Wolfram, 1985) è un sistema dinamico discreto costituito da un insieme di elementi finiti (celle o *Cellular Automaton*); il sistema evolve a step anch'essi discreti. Ogni elemento del sistema può assumere un numero discreto e finito di stati. Ad ogni step evolutivo ciascun automa "evolve", ovvero modifica il suo stato, sulla base di una regola locale in cui si tiene conto dello stato di tutte le 8 celle adiacenti. Infine tutte le celle vengono aggiornate in maniera sincrona, quindi ogni automa  $A_i$  assumerà, al tempo  $t$  uno stato che dipende dagli stati delle celle dell'intorno  $A_j$  al tempo  $t-1$ . E' indispensabile notare che il tempo di cui si parla qui è il tempo di evoluzione del sistema cellulare e nulla ha a che vedere con il tempo di integrazione.

Vediamo come questi concetti si applicano nella ricostruzione dei campi di precipitazione durante l'integrazione del modello CHyM. Cominciamo dalla impostazione del problema:

- La griglia di CHyM viene assimilata ad un aggregato di automi cellulari;
- Lo stato di ogni automa corrisponde al valore della precipitazione in quel punto;
- Il sistema si evolve in maniera che ogni cella assuma un valore di precipitazione più prossimo alla media dell'intorno. Formalmente, se  $P_i$  è il valore della precipitazione nella cella  $i$ , esso viene modificato come:

$$P_i \rightarrow P_i + \alpha \sum_j \beta_j (P_j - P_i)$$

essendo la sommatoria calcolata su tutte le 8 celle dell'intorno ed  $\alpha$  un piccolo coefficiente;  $\beta_j$  è un coefficiente normalizzato che tiene conto della diversa distanza tra le celle, ad esempio è ovvio che la cella a Nord sia meno distante (e quindi deve pesare di più nella sommatoria) rispetto alle celle che si trovano a Nord-Ovest e Nord-Est.

- Il sistema viene inizializzato assegnando agli automi corrispondenti a punti di misura (o punti di griglia del modello meteorologico) il valore osservato (previsto) di precipitazione e questi automi conservano sempre lo stesso stato nel corso delle successive fasi. L'evoluzione del sistema termina quando si raggiunge uno stato quasi stabile, ovvero tutto il sistema di automi (o, se si vuole, il campo di precipitazione) non subisce significative modifiche tra uno step evolutivo ed il successivo. La misura di queste modifiche si basa solitamente sul cambiamento medio dello stato degli automi.

<sup>4</sup> MM5: <http://www2.mmm.ucar.edu/mm5/>

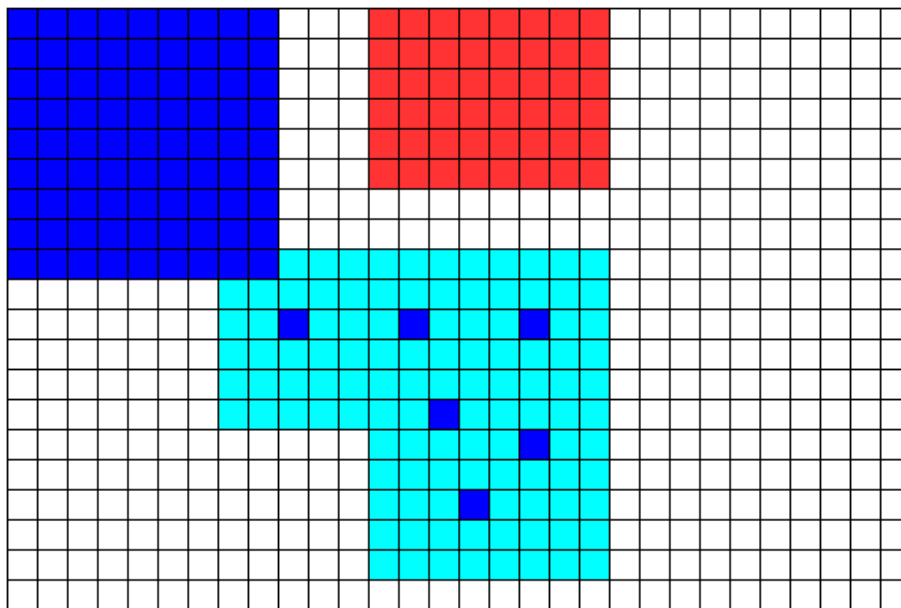
<sup>5</sup> WRF, Weather Research and Forecasting Model: <http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/>

In termini prettamente concettuali, il sistema assume che, alle risoluzioni spaziali tipiche delle simulazioni idrologiche (poche centinaia di metri), diventi una buona approssimazione pensare che la precipitazione in un punto, sia la media della precipitazione osservata nei punti dell'intorno. Essenzialmente la iterazione dell'algoritmo, fino all'ottenimento di uno stato quasi-stabile, "cerca" una soluzione di questo tipo compatibile con i valori osservati disponibili.

Per ogni ora di integrazione di CHyM, l'algoritmo viene iterato per ogni sorgente di dati disponibile; in questo modo si può tener conto della gerarchia di affidabilità, assimilando una sorgente alla volta a partire da quella più ritenuta più certa. Una schematizzazione di quanto abbiamo descritto finora e specificatamente della naturale modulare e gerarchica del sistema di ingestione dati è riportata nella Figura 4. Nell'esempio riportato si assume che una parte del dominio sia stato "coperto" da un'altra sorgente (zona blu), mentre il modulo successivo ricostruirà la precipitazione sul sottodominio azzurro utilizzando i punti blu di misura all'interno di esso. Nell'evoluzione del sistema cellulare i punti blu vengono tenuti fissi, mentre i punti azzurri "evolvono" fino al raggiungimento dello stato stabile, in altri termini la pioggia nel sottodominio azzurro viene interpolata utilizzando i forzanti costituiti dagli automi blu interni ed esterni al sottodominio stesso. Nella schematizzazione riportata in figura si evidenzia anche una zona rossa che, per così dire, non viene utilizzata, perché, ad esempio cade sul mare o su un bacino esterno a quello che si intende simulare.

Rispetto ad altri approcci di interpolazione basati su algoritmi statistici (il cosiddetto *Kriging* è quello più utilizzato), l'algoritmo cellulare ha il vantaggio (essenziale per poter lavorare efficacemente nelle situazioni operative) di poter operare con un numero arbitrario di punti di osservazione e/o di previsione; quindi, nel corso dell'integrazione, CHyM utilizza, per ogni ora, il "meglio" dei dati disponibili e questo "meglio" cambia ad ogni step orario di integrazione.

Facciamo ad esempio notare che, nel nostro Paese, le osservazioni radar e pluviometriche sono gestite da una molteplicità di enti e una vera integrazione e razionalizzazione di queste misure è ben lungi dall'essere realizzata. Questo comporta che, in situazioni operative, abbiamo a disposizione un certo numero di misure alle ore, diciamo 5, ma solo un sottoinsieme di queste all'ora successiva; il sistema proposto cerca di "mettere una pezza" a questa peculiare problematicità.



**Figura 4. Ricostruzione schematica di come il modello CHyM utilizza le diverse sorgenti di dati per ricostruire il campo di precipitazione. Il sistema modulare assimila una sorgente di dati alla volta.**

La sequenza di algoritmi che abbiamo sinteticamente descritto fin qui consente, quindi, di ottenere, per ogni ora integrazione, la stima del campo di precipitazione più affidabile per poter forzare la simulazione idrologica. Ribadiamo che, anche si tratta di una previsione sul “futuro” quindi basata sulle previsioni meteorologiche, la ricostruzione dettagliata del “passato” è essenziale per una realistica ricostruzione dello stato della rete drenante nel momento “operativo” in cui la previsione idrologica viene effettuata.

Proprio per questo motivo, nel valutare l’affidabilità della simulazione che stiamo utilizzando (e quindi degli indici di allarme di cui discutiamo nel capitolo successivo) è essenziale avere una chiara percezione di quelle che sono, di ora in ora, le sorgenti di dati utilizzate per la simulazione idrologica. Per questo motivo il modello “conserva memoria” nel file di output della sorgente dati che, per ogni punto di griglia e per ogni step di integrazione, si è utilizza. La seconda sequenza di mappe, nonché l’apposito file NetCDF acquisito da ENEA per la visualizzazione e l’utilizzo nella piattaforma DSS, “racconta” sinteticamente questa storia.

Un esempio di queste sequenze è riportato nella Figura 5. Qui, in ogni mappa, i falsi colori indicano le diverse sorgenti utilizzate. In questo caso, che si riferisce allo studio a posteriori dell’evento del dicembre 2008, si può notare come gran parte del dominio sia coperto dalle osservazioni pluviometriche (blu nella mappa), ma nei sottodomini dove le osservazioni a terra sono, invece, troppo distanti la pioggia viene ricostruita sulla base delle simulazioni meteo effettuate con i modelli MM5 e WRF.

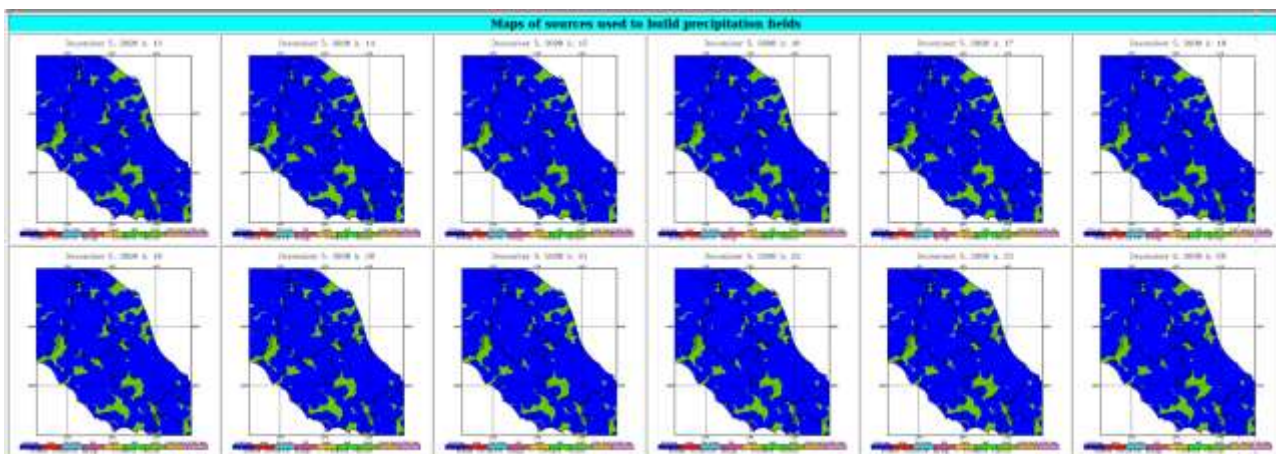


Figura 5. Un esempio della sequenza delle mappe delle sorgenti di dati utilizzate per la ricostruzione del campo di precipitazione; i falsi colori indicano le diverse sorgenti.



## 1.2 Le mappe degli indici di allerta

A valle delle simulazioni idrologiche descritte nel Paragrafo precedente, le situazioni di rischio vengono evidenziate, sia dal punto di vista spaziale che temporale, sulla base di due indici di allerta calcolati in maniera affatto diversa.

Richiamiamo brevemente i concetti e le definizioni che sono alla base del calcolo di questi indici, rimandando alla relazione delle attività dell'anno precedente per una descrizione più dettagliata ed estesa.

Le esondazioni e, più in generale, i fenomeni critici, che si originano da precipitazioni intense, non dipendono “*banalmente*” dall'intensità delle precipitazioni stesse o dalla precipitazione che si accumula in un certo intervallo di ore in un punto o in una porzione di territorio, ma sono causati dalla complessa distribuzione spaziale e temporale delle piogge. Come esempio “estremo” possiamo pensare che, se una perturbazione causa precipitazioni intense muovendosi dalla foce di un fiume verso le colline, queste precipitazioni verranno drenate da una rete idrografica che si trova in secca o comunque è caratterizzata da un deflusso minimo. La situazione è totalmente diversa se l'evento meteorico si muove dalla sorgente verso il mare; in questo caso la pioggia si riversa su aste fluviali che stanno già drenando la precipitazione caduta a monte nelle ore precedenti. In sintesi: lo stesso scenario precipitativo dà luogo a livelli di portata che sono completamente diversi.

Appare chiaro, quindi, che un serio sistema di allarme debba basarsi non semplicemente sulle mappe di precipitazioni previste e/o osservate, ma sui livelli di portata che questi fenomeni tendono a generare. D'altro canto non è affatto banale individuare, per ogni segmento della rete drenante, un livello di portata da considerare “critico”, in quanto la sezione dell'alveo fluviale cambia sensibilmente anche nell'arco di distanze brevi (pochi chilometri). Per cercare di superare queste complesse criticità, sono stati sviluppati, proposti e testati dagli autori del presente Report, due distinti indici di allarme, già introdotti nel corso delle attività dell'Accordo di Collaborazione portato avanti nel PAR2016 (cfr. Report RdS/PAR2016/022) e di cui discutiamo in seguito con maggiore dettaglio, alla luce delle attività successivamente svolte nel corso della presente annualità (PAR2017).

Il cosiddetto CAI (Tomassetti et al., 2005, Verdecchia et al., 2008) è il primo (in ordine di tempo) di due diversi indici che vengono utilizzati per il *Flood Alert Mapping*. Il *CHyM Alarm Index* è calcolato a partire dallo scenario di precipitazione, inteso come la sequenza temporale di pioggia che si riversa nelle diverse zone del bacino.

Il secondo indice, chiamato BDD ovvero *Best Discharge-based Drainage alarm index* è invece calcolato sulla base dei valori di portata che sono deterministicamente calcolati dal modello sulla base della fluidodinamica che regola lo scorrimento superficiale delle acque; il “Best” a cui si fa riferimento nell'acronimo dell'indice, allude al fatto che sono state testate diverse definizioni ed approcci numerici, e quello proposto è che quello che risulta migliore dal punto di vista dell'individuazione dei quei segmenti della rete drenante dove ci si aspettano fenomeni critici.

Nei successivi Paragrafi si vedrà in dettaglio la definizione ed il calcolo di questi indici e la loro visualizzazione nelle simulazioni rese operative.

### 1.2.1 L'indice CAI

Concettualmente il CAI viene calcolato, per ogni punto di griglia, come il rapporto tra il totale della precipitazione drenata dal bacino a monte della cella, e la superficie totale del bacino drenato. Se immaginiamo di trovarci in un punto “dentro” ad un torrente, quindi, il denominatore della frazione è costituita dall’area a monte le cui acque superficiali, drenano verso il punto in cui ci troviamo. Il numeratore della frazione è, invece, il totale della precipitazione che è caduta in quel bacino a monte.

Prima di dare una definizione più formale, notiamo intanto che il CAI ha una semplice interpretazione fisica: esso rappresenta la precipitazione media drenata da un elemento della rete idrografica. Notiamo, inoltre, che il fatto di considerare la precipitazione, in un certo intervallo temporale ed in certo dominio geografico, riduce di molto le incertezze legate alla imprecisione con cui la pioggia viene misurata e/o prevista; ad esempio uno spostamento di qualche ora della precipitazione prevista rispetto a quanto verrà osservato, non incide sull’indice che abbiamo definito, purché lo *shift* temporale sia ragionevolmente minore del tempo di corrivazione medio che definiremo più in dettaglio tra poco.

Formalmente il CAI, ad un certo istante  $t$  e per ogni cella elementare in cui è diviso il dominio, è calcolato come:

$$CAI = \frac{\int_{UP} \int_{t-\Delta t}^t P(t,s) dt ds}{\int_{UP} ds}$$

dove  $s$  e  $t$  sono qui rispettivamente le variabili temporali e spaziali, mentre  $P(t,s)$  rappresenta il campo di precipitazione.

Come già detto, l’integrazione spaziale viene effettuata, per ogni cella elementare, considerando il dominio a monte del punto di griglia considerato. Parleremo, da qui in avanti, per semplicità espositiva di “*precipitazione*”, in realtà per rendere più realistico l’indice di stress, viene considerata l’acqua effettivamente disponibile per il runoff, ovvero la precipitazione meno i contributi di perdita per infiltrazione, evapotraspirazione ed evaporazione; in caso di copertura nevosa viene inoltre considerato il contributo al ciclo idrologico che viene dallo scioglimento delle nevi.

Meno semplice è la scelta dell’intervallo temporale su cui effettuare l’integrazione, ovvero il  $\Delta t$  che compare nella formula precedente, la scelta più generale appare quella di considerare un intervallo di tempo pari al tempo medio di corrivazione del sottobacino considerato, ovvero del bacino a monte della cella che si considera (la stessa area su cui si calcola l’integrale spaziale).

Per una sintesi finale, se supponiamo di voler calcolare il CAI esattamente alla foce di un fiume:

- L’integrale spaziale viene calcolato su tutto il bacino del fiume
- L’integrazione temporale si effettua sul tempo medio di corrivazione di tutto il bacino; per il Tevere, ad esempio, questo intervallo è di poco superiore ai 2 giorni, e questo intervallo è una media pesata tra i punti più a monte del bacino che vengono drenati verso il mar Tirreno in poco più di 4 giorni ed i punti più vicino al bacino che vengono drenati in pochi minuti (si veda la Figura 01 e la relativa discussione per maggiori dettagli).
- La precipitazione che si considera è quella che è caduta in tutto il bacino.

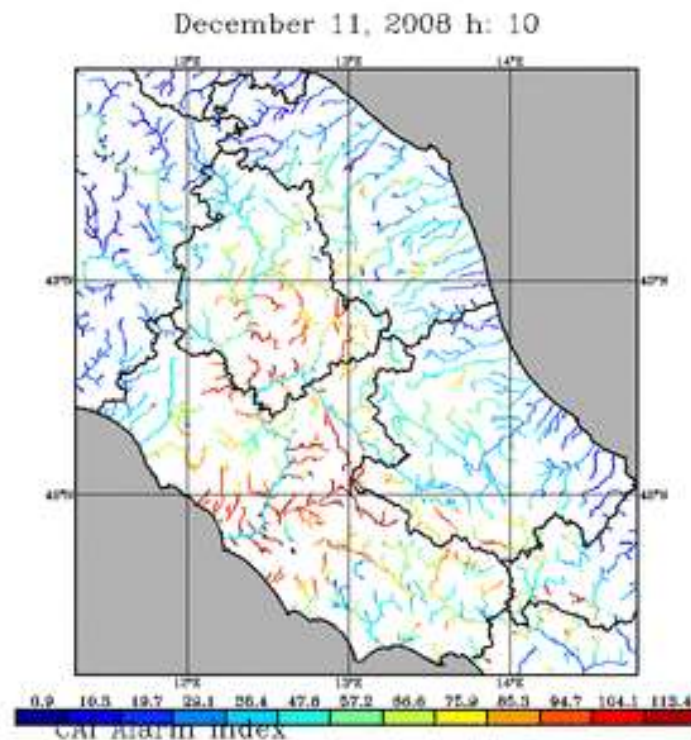
Dai moltissimi test che si sono fatti per molti casi studio inerenti alle tante situazioni critiche che hanno interessato il territorio italiano negli ultimi 10 anni, il CAI risulta estremamente significativo ad evidenziare situazioni di stress per i piccoli torrenti, mentre il BDD, che vedremo nel Paragrafo successivo, appare più significativo per le aste principali della rete drenante. Il valore limite di tale indice, al disopra del quale ci si aspetta una situazione critica è, tanto per far riferimento ad un numero “*tondo*”, dell’ordine di 100

mm/giorno. Si noti bene che questo valore non corrisponde ad un valore di precipitazione in un punto, ma alla precipitazione media in una certa parte del bacino e nell'intervallo temporale determinato come descritto sopra. Ricordiamo ancora che parliamo, per semplicità espositiva, di "pioggia", ma intendiamo in realtà la precipitazione effettivamente disponibile per lo scorrimento superficiale.

L'indice di allarme così calcolato viene visualizzato sul sito dell'Università dell'Aquila e sulla piattaforma DSS in termini sia di mappe sia di sequenze temporali. Mentre di queste ultime parleremo successivamente nel Paragrafo 2, un esempio di mappa del CAI appare nella Figura 6.

La sequenza riportata in Figura 16 si riferisce ad un caso studio (sul quale si ritornerà nel successivo Paragrafo 2) che ha causato non poche criticità a Roma e nei dintorni della Capitale, sia dal punto di vista idrologico, sia dal punto di vista del Sistema Elettrico (come segnalato da Areti, il gestore della rete di distribuzione elettrica nell'area di interesse). In particolare si tratta dell'evento, o meglio della sequenza di eventi severi che si sono verificati nella prima decade di dicembre 2008, con diffuse celle di intense precipitazioni che si sono riversate su tutto il Bacino del Tevere.

Lo scopo della Figura 6 e della Figura 16 è ovviamente solo dimostrativo: per una analisi più dettagliata, rimandiamo al sito Web dove è possibile visualizzare le mappe con maggiore dettaglio. In questa sede è opportuno evidenziare, innanzitutto la rapida evoluzione sinottica dell'allarme idrologico, che è maggiormente critico nell'alta parte dell'Umbria nelle prime ore simulate; quindi, si sposta rapidamente nel Lazio "predicendo" la esondazione dell'Aniene (che è effettivamente avvenuta in corrispondenza dell'evento dell'11-12 dicembre 2008) e successivamente investe gran parte dei torrenti che, dalle zone limitrofe della Capitale, drenano verso l'asta fluviale principale del Tevere.



**Figura 6. Un esempio di mappa del CAI index per l'evento che ha investito il bacino del Tevere nel dicembre del 2008 e che ha causato molte criticità dal punto di vista idrologico.**

### 1.2.2 L'indice BDD

Avendo a disposizione una simulazione idrologica in grado di prevedere, in maniera deterministica e basandosi su un modello fisico, la portata sull'intero bacino idrografico, appare naturale cercare di sviluppare un approccio per l'Alert Mapping che si basi anche sui valori di portata previsti.

Questo altro indice è chiamato BDD ovvero *Best Discharge-based Drainage alarm index*.

In astratto, l'idea è quella di rapportare il valore massimo della portata in un certo punto di griglia, con la sezione dell'alveo del fiume in quel punto. La sezione dell'alveo è solitamente stimata, in gran parte della letteratura scientifica, sulla base del cosiddetto raggio idraulico, essendo quest'ultimo una funzione circa lineare dell'area drenata a monte. Più in dettaglio, per ogni punto di griglia e per ogni intervallo di tempo simulato dal modello che va da un generico istante  $t_1$  ad un generico istante  $t_2$ , definiamo il *BDD index* come:

$$BDD(t_1 \rightarrow t_2) = \frac{\max_{t_1 \rightarrow t_2} Q(t)}{R^2}$$

dove il numeratore rappresenta il valore massimo della portata che si prevede per l'intervallo di tempo considerato, mentre al denominatore compare il raggio idraulico del fiume nel punto considerato. In accordo con la letteratura scientifica, quest'ultimo può essere stimato come:

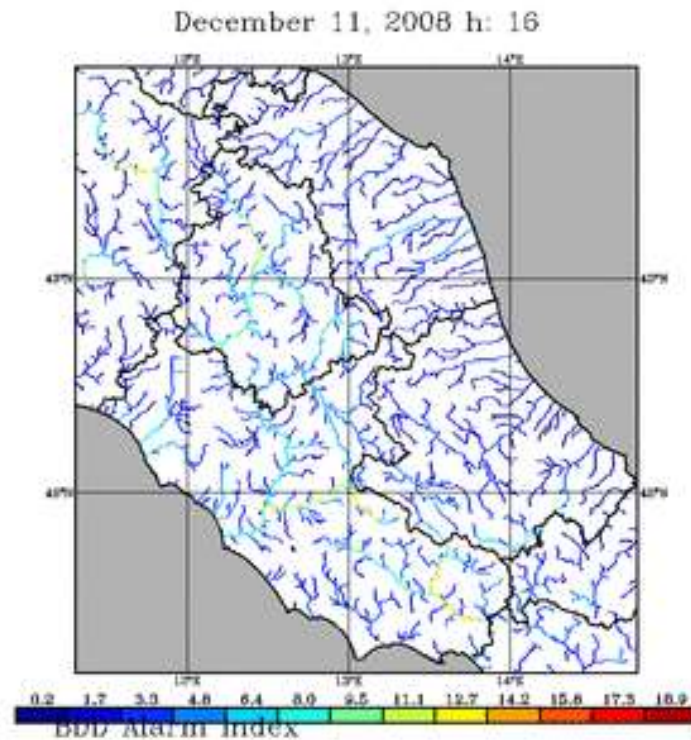
$$R = \alpha + \beta D^\gamma$$

essendo  $D$  l'area a monte drenata dal punto in esame, mentre i coefficienti  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  assumono i valori presi dalla letteratura; di solito, misurando il raggio idraulico in metri e l'area drenata in  $\text{Km}^2$ , si assume  $\alpha=0.0015$ ,  $\beta=0.35$  e  $\gamma=0.33$ .

Oltre che per le sue *performances* testate analizzando decine di casi studio, il BDD appare adatto all'utilizzo in modalità operativa in quanto ha una semplice interpretazione fisica; si tratta, infatti, di una portata "*normalizzata*" che rappresenta il flusso di precipitazione attraverso la sezione considerata. Si trova che un arbitrario elemento della rete drenante è in grado di resistere ad una portata massima di circa 20 mm/ora, al di sopra di questo limite la sezione del fiume risulta mediamente insufficiente e quindi ci si aspetta che il fiumi esondi o allaghi le aree alluvionali circostanti.

L'esperienza acquisita mostra che il BDD è più adatto ad individuare i segmenti dei bacini medio grandi che sono sottoposti a maggiore stress, mentre il CAI è più efficace a localizzare situazioni di rischio nei torrenti medio-piccoli; per questo motivo verranno prodotte mappe con entrambi gli indici (si veda ad esempio, Tomassetti et al., 2005 per applicazioni a singoli casi studio e calibrazione dei valori di allerta).

Anche per il BDD riportiamo nella Figura 7 un esempio di mappa, mentre nella Figura 14 è riportata la sequenza che si riferisce al caso studio definito congiuntamente con ENEA ed Areti, che ha causato non poche criticità a Roma e nei dintorni della Capitale, sia dal punto di vista idrologico, sia dal punto di vista del Sistema Elettrico. In particolare, si tratta dell'evento, o meglio della sequenza di eventi severi che si sono verificati nella prima decade di dicembre 2008, con diffuse celle di intense precipitazioni che si sono riversate su tutto il Bacino del Tevere.



**Figura 7. Un esempio di mappe del *BDD index* per l'evento che ha investito il bacino del Tevere nel dicembre del 2008 e che ha causato molte criticità dal punto di vista idrologico.**

Anche in questo caso, lo scopo della Figura 7 e della Figura 14 è ovviamente solo dimostrativa, per una analisi più approfondita, rimandiamo al sito Web o al DSS CIPCast, nel cui contesto è possibile visualizzare le mappe con maggiore dettaglio.

Per quanto riguarda gli obiettivi della collaborazione portata avanti nella presente annualità progettuale, si sottolinea come tutte le mappe precedentemente descritte siano oggi aggiornate quotidianamente e rese disponibili in forma grafica sia sul sito del DSFC dell'Università dell'Aquila, sia sulla piattaforma DSS CIPCast.

## 2 Caso di studio: allerta per i siti critici di ACEA-Areti

Nel corso delle attività dell’Accordo di Collaborazione portate avanti nell’ambito del PAR2017, come detto in precedenza, è stato definito un caso di studio che riguardasse la valutazione e la previsione del rischio e degli impatti sulle infrastrutture del distretto urbano. A tal fine, si sono avuti ripetuti incontri con i responsabili ed i tecnici di Areti unitamente ad una lunga ed intensa attività di collaborazione con il gruppo di lavoro del Laboratorio DTE-SEN-APIC di ENEA. Pertanto, oltre alle sequenze di mappe, sia di precipitazione, sia degli indici di stress di cui alcuni esempi sono stati riportati nelle figure precedenti, è emersa la necessità di “specializzare” le previsioni su siti specifici ed in particolare su siti considerati di interesse primario per le attività gestite da Areti.

Sulla base di ciò, è stato definito ed implementato un prototipo di analisi, già sufficientemente sofisticato e rilasciato in modalità operativa sia sulla piattaforma web del DFSC dell’Università dell’Aquila dedicata al progetto, sia sulla piattaforma DSS CIPCast. Il completamento di tale prototipo, tuttavia, richiederebbe step implementativi aggiuntivi (ad esempio, con l’inserimento di altri casi di studio significativi) ed una ulteriore fase di validazione e test.

Come primo fondamentale obiettivo ci si è posti quello di specializzare il calcolo e la visualizzazione degli indici di allarme idrologico in corrispondenza delle Cabine Primarie (CP) della rete a Media Tensione (MT) di Areti. Il prodotto finale consiste in una sequenza temporale di indici di stress, calcolati per le 24 ore successive (“future”) rispetto al momento della simulazione, e facenti riferimento alle 22 CP indicate da Areti come elementi critici (in quanto rappresentano l’interfaccia tra la rete di trasmissione e quella di distribuzione).

Il primo problema per il raggiungimento di questo obiettivo è stato stabilire la “sorgente idrologica del pericolo”, ovvero - data la posizione di una CP - valutare attraverso un algoritmo generale quale dei segmenti della rete drenante che insistono sulla cabina, rappresentasse il principale pericolo o la fonte di emergenza primaria. L’approccio scelto, dopo numerose interazioni e discussione con il gruppo di lavoro del Laboratorio DTE-SEN-APIC dell’ENEA (congiuntamente con i tecnici di Areti) è stato quello di considerare il punto di griglia più vicino al sito in questione che drena almeno un’area complessiva di 100 Km<sup>2</sup>. Di questa scelta rimane traccia nella tabella prodotta in operativo è di cui una porzione viene riprodotta nella Figura 8.

| Record                             | 1     | 2     | 3    |
|------------------------------------|-------|-------|------|
| ACEA Id                            | 76    | 26    | 32   |
| Distance (Km) from closest channel | 0.8   | 0.4   | 12.4 |
| Drained area (Km <sup>2</sup> )    | 14516 | 16953 | 101  |
| December 5, 2008 h: 13.00          | 0.3   | 0.3   | 0.1  |
| December 5, 2008 h: 14.00          | 0.3   | 0.3   | 0.1  |

Figura 8. L’individuazione del “closest channel” per ogni cabina principale di Areti. La terza e la quarta riga della tabella indicano, per ogni sito ove si trova la cabina principale di Areti, la distanza in km dalla prima cella-canale simulata da CHyM ed il valore (in Km<sup>2</sup>) dell’area drenata da tale cella.

La tabella riprodotta nella Figura 8 riporta nella prima riga un codice progressivo e nella seconda riga un codice che, per Areti, è associato univocamente ad una specifica CP situata in un certo sito. Nella terza e quarta riga, per ogni sito, la procedura calcola la posizione sulla griglia di CHyM e quindi la distanza in Km del punto-griglia-canale più vicino, il fatto che sia un punto di canale, ovvero di fiume, è garantito dal fatto

che quel punto drena, a monte, almeno 100 Km<sup>2</sup> di territorio. Il valore dell'area drenata è riportato nella quarta riga della tabella.

Quello che segue è la sequenza temporale degli indici CAI e BDD per ognuno dei siti (più esattamente per ognuna delle celle di CHyM individuate con l'algoritmo descritto sopra). Un esempio di queste visualizzazioni è riportato nelle successive Figure: i dati si riferiscono, in questo caso, alle simulazioni effettuate rispettivamente per le giornate del 5 e 6 dicembre 2008 (Figura 11, Figura 13, Figura 15, Figura 17 e Figura 19) e dell'11 e 12 dicembre 2008 (Figura 12, Figura 14, Figura 16, Figura 18 e Figura 20), che hanno visto, come abbiamo già scritto, numerose criticità idrologiche e relative al sistema elettrico.

Per rendere più immediatamente visualizzabile la sinottica dei possibili stress che si aspetta, gli elementi della tabella vengono colorati in giallo o in rosso, a seconda di due soglie che sono stabilite, per il momento, sulla base delle attività di test e di calibrazione che hanno riguardato gli allarmi idrologici; questi livelli sembrano comunque ben adattarsi a segnalare possibili criticità anche per quello che riguarda gli impianti principali della rete elettrica.

In particolare, la Figura 17 riporta i dati in termini dell'indice BDD relativo all'evento del 5-6 dicembre 2008 ed una prima lettura, con particolare attenzione agli elementi "in giallo" della tabella, consente di visualizzare che lo stress principale riguarda solo i piccoli torrenti (l'area drenata riportata nella quarta riga della tabella è piccola per quelle colonne).

Quindi come indicazione, in un possibile scenario operativo in cui tecnici ottengono questa informazione, se ne dedurrebbe che l'evento meteo (e quindi idrologico) è caratterizzato da intensi fenomeni locali che potranno quindi mettere in crisi solo le cabine evidenziate nella tabella.

Considerazioni analoghe possono farsi guardando la tabella riportata nella Figura 19, che riporta una analoga visualizzazione, stavolta sulla base dell'indice CAI. I siti ed il timing di maggiore stress è in buon accordo nel caso in studio; ricordiamo che i due indici sono calcolati in maniera affatto diversa e quindi il fatto che siano in buon accordo tra loro è molto significativo.

L'utilizzo del codice numerico consente la possibilità di rendere pubblica la tabella senza la necessità di definire accessi riservati sul Web. Invece, nell'interfaccia WebGIS di CIPCast, poiché l'accesso è possibile attraverso l'autenticazione con specifiche credenziali, queste informazioni sono visibili "in chiaro", geolocalizzate e consultabili complete di attributi descrittivi (Figura 9 e Figura 10).

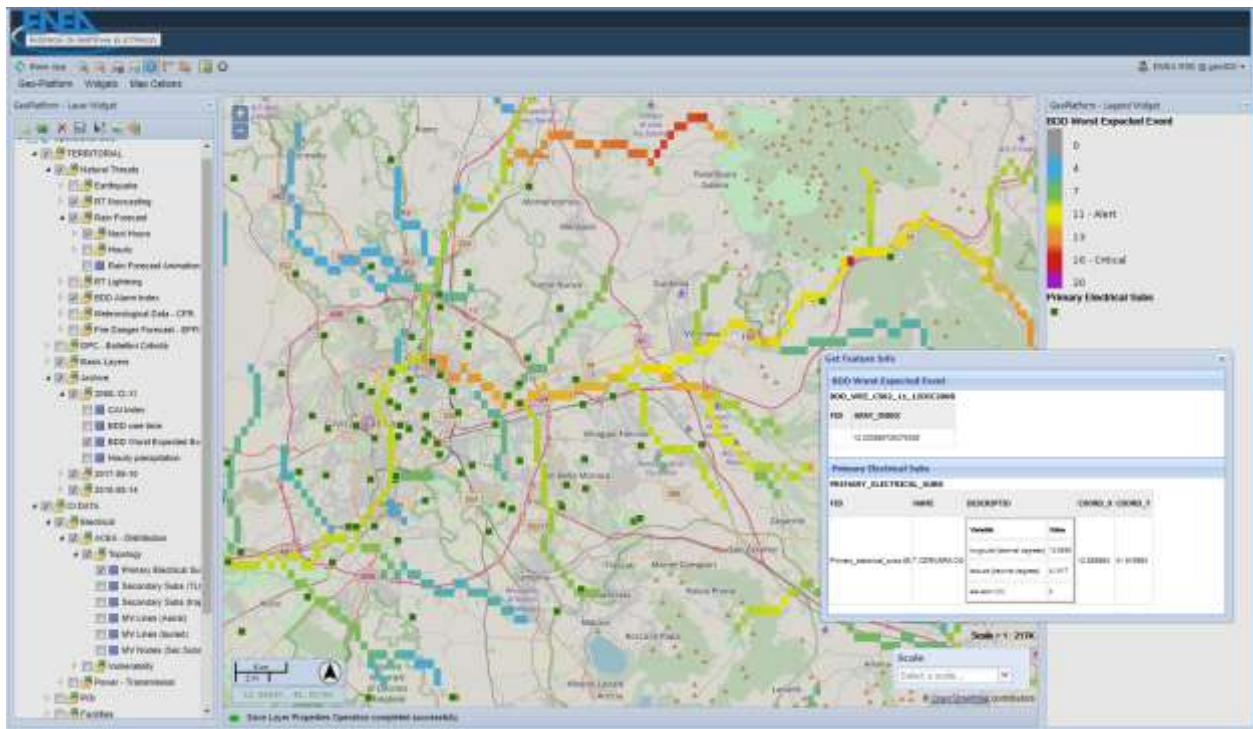


Figura 9. Visualizzazione integrata della mappa di BDD index e della localizzazione delle Cabine Primarie della rete MT di Areti per il caso studio dell'11-12 dicembre 2008.

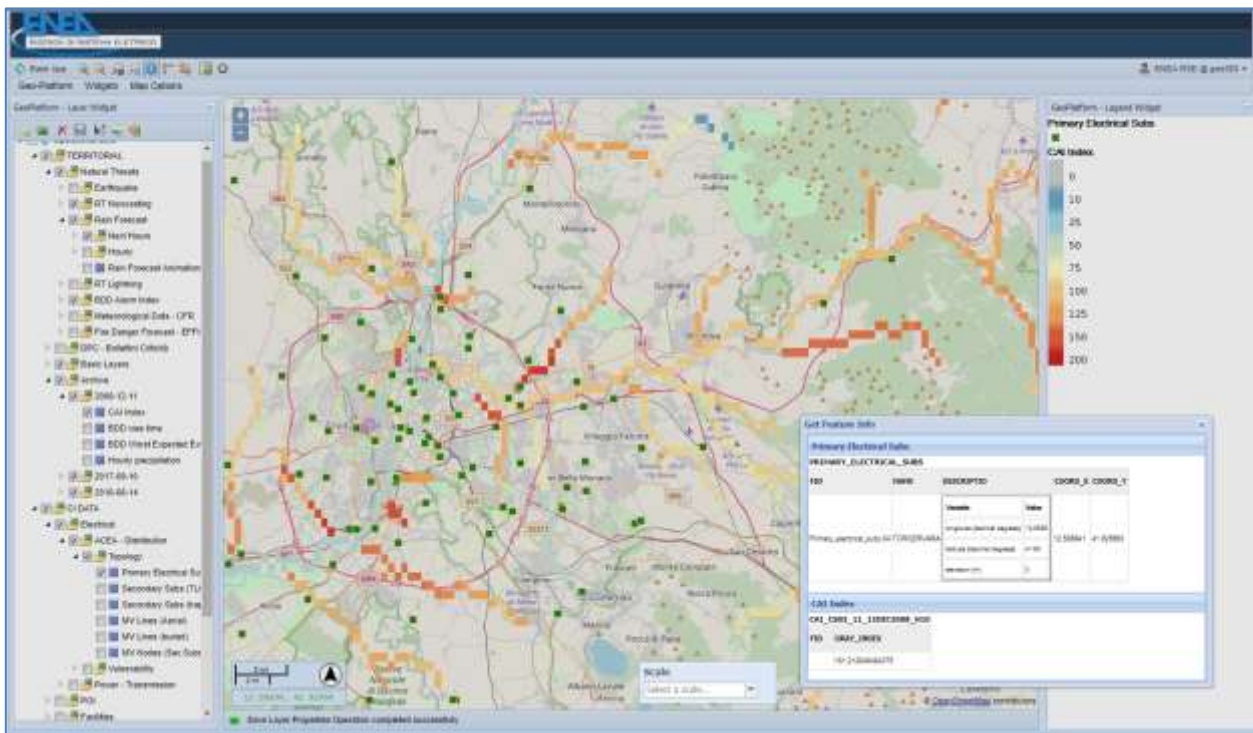


Figura 10. Visualizzazione integrata della mappa di CAI index e della localizzazione delle Cabine Primarie della rete MT di Areti per il caso studio dell'11-12 dicembre 2008.



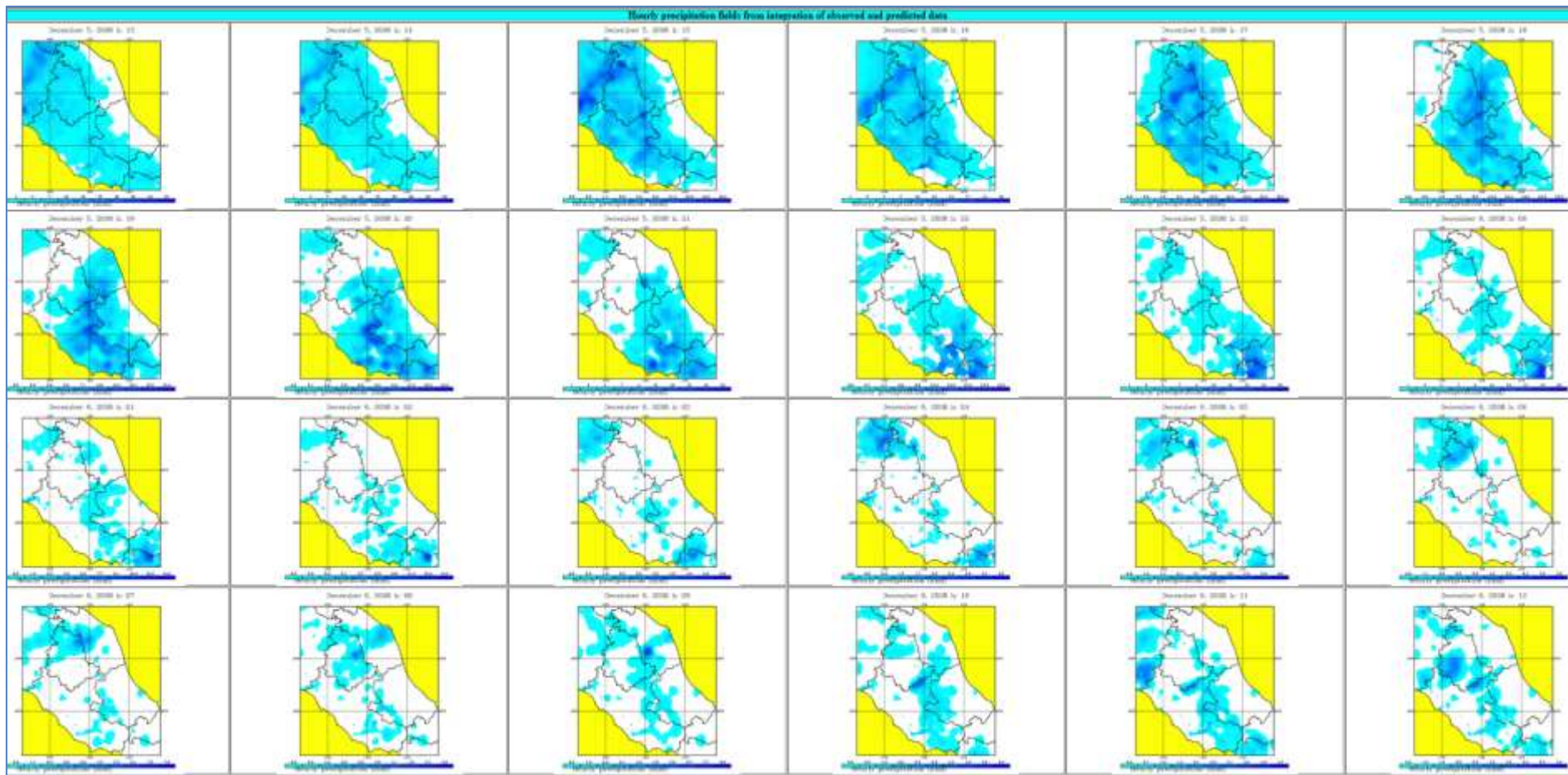


Figura 11. Sequenza delle mappe di precipitazione per il caso studio del 5-6 dicembre 2008.

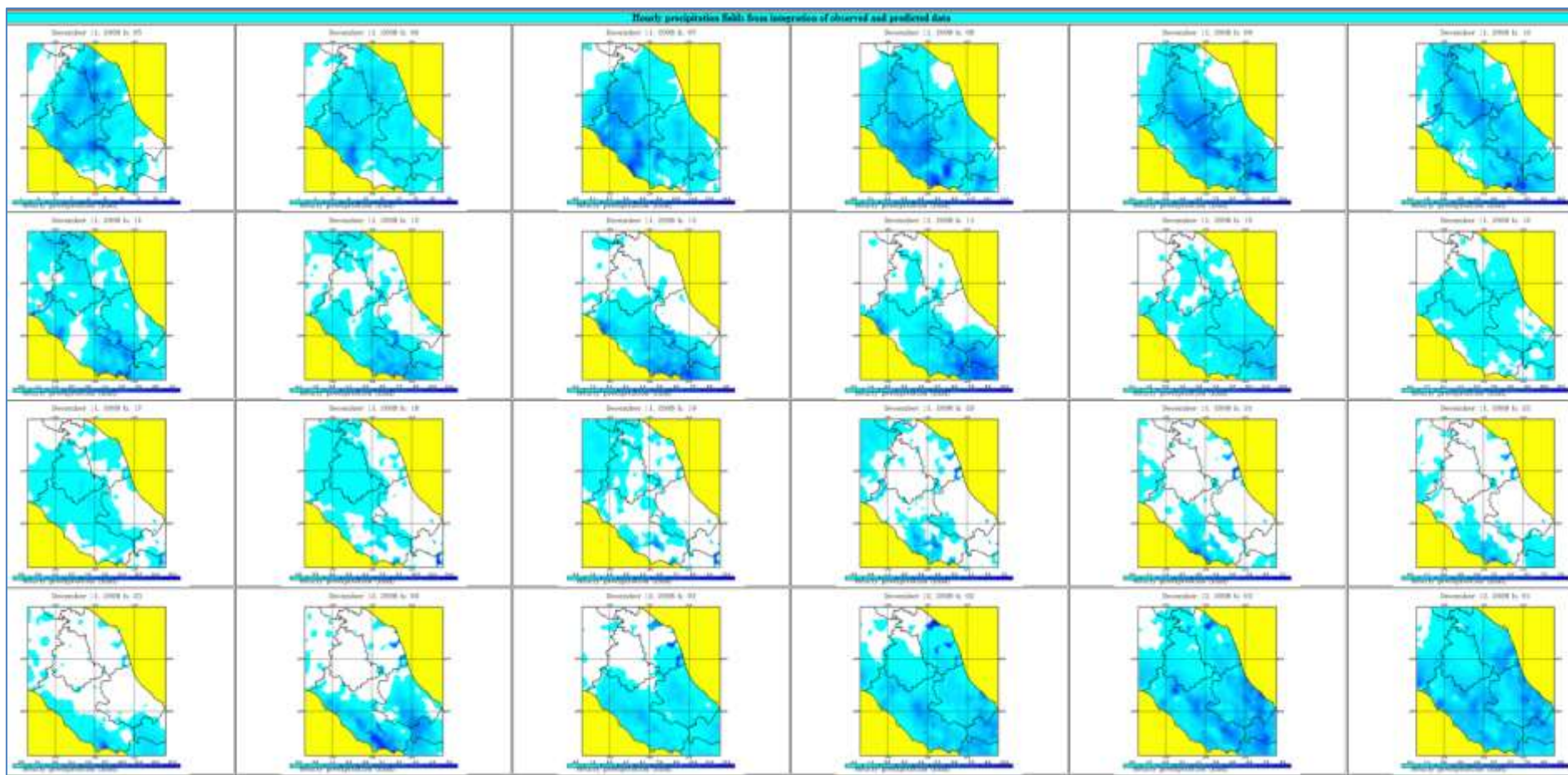


Figura 12. Sequenza delle mappe di precipitazione per il caso studio dell'11-12 dicembre 2008

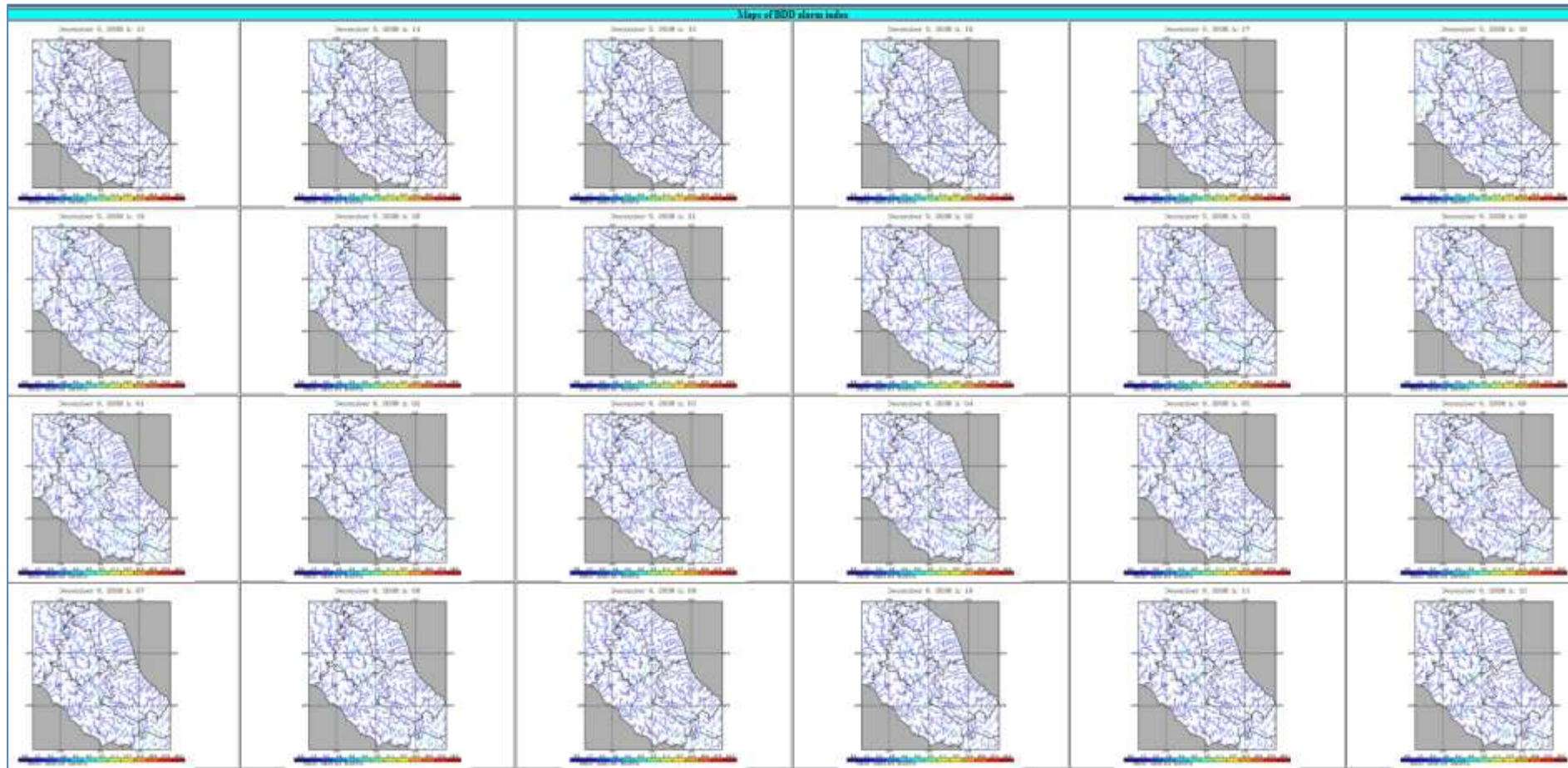


Figura 13. Sequenza delle mappe di BDD index per il caso studio del 5-6 dicembre 2008.

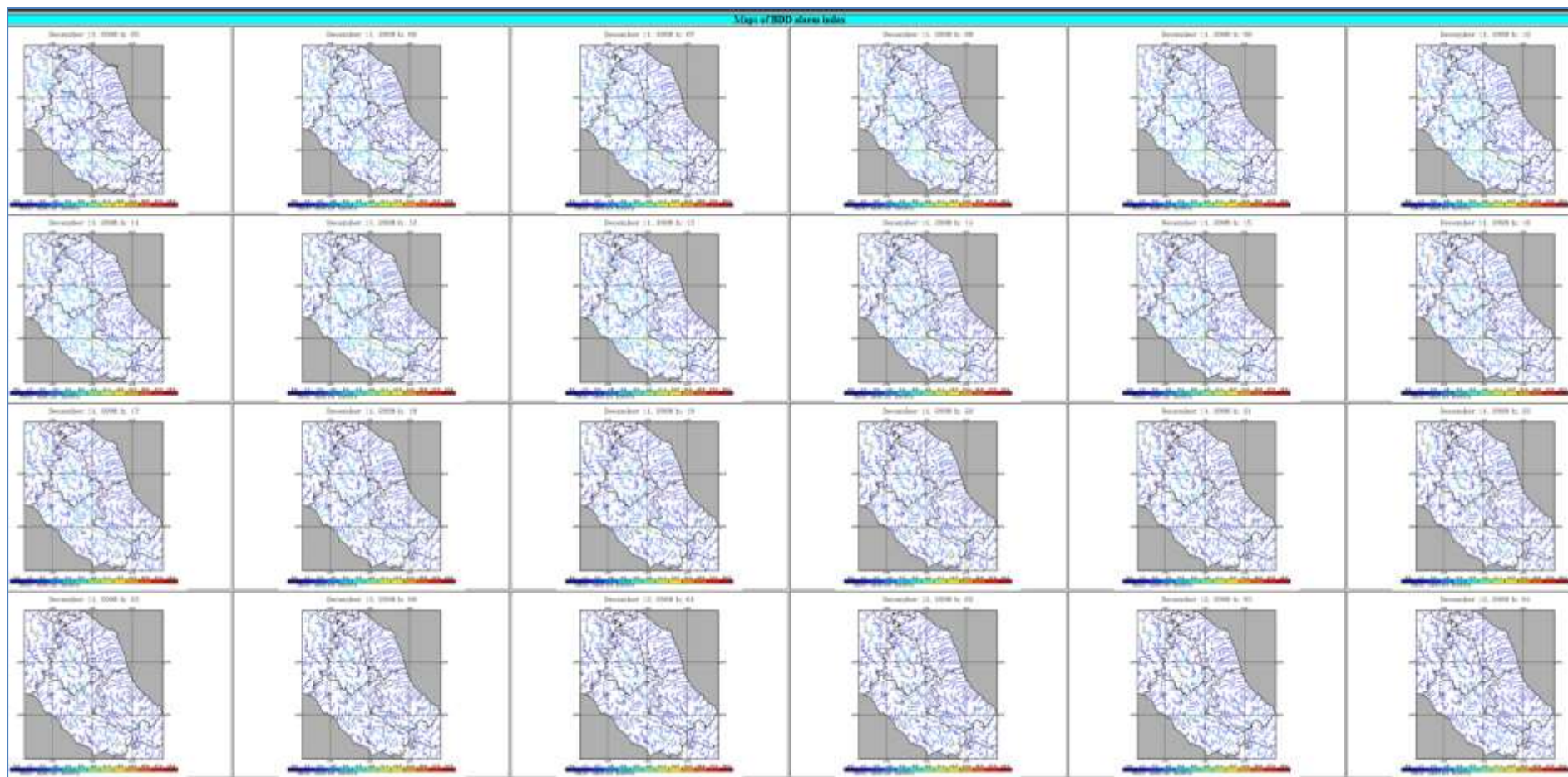


Figura 14. Sequenza delle mappe di BDD index per il caso studio dell'11-12 dicembre 2008

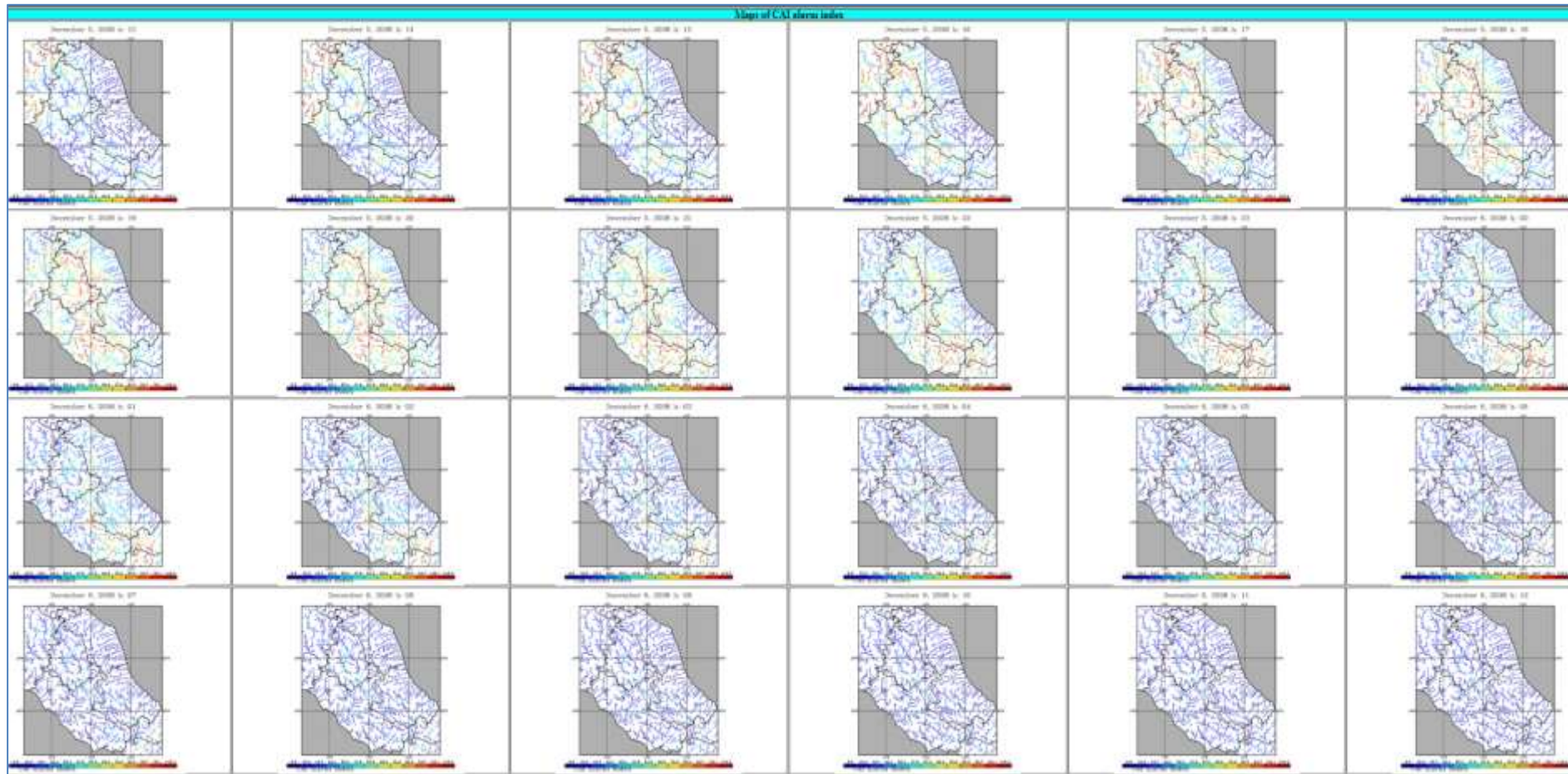


Figura 15. Sequenza delle mappe di CAI index per il caso studio del 5-6 dicembre 2008.

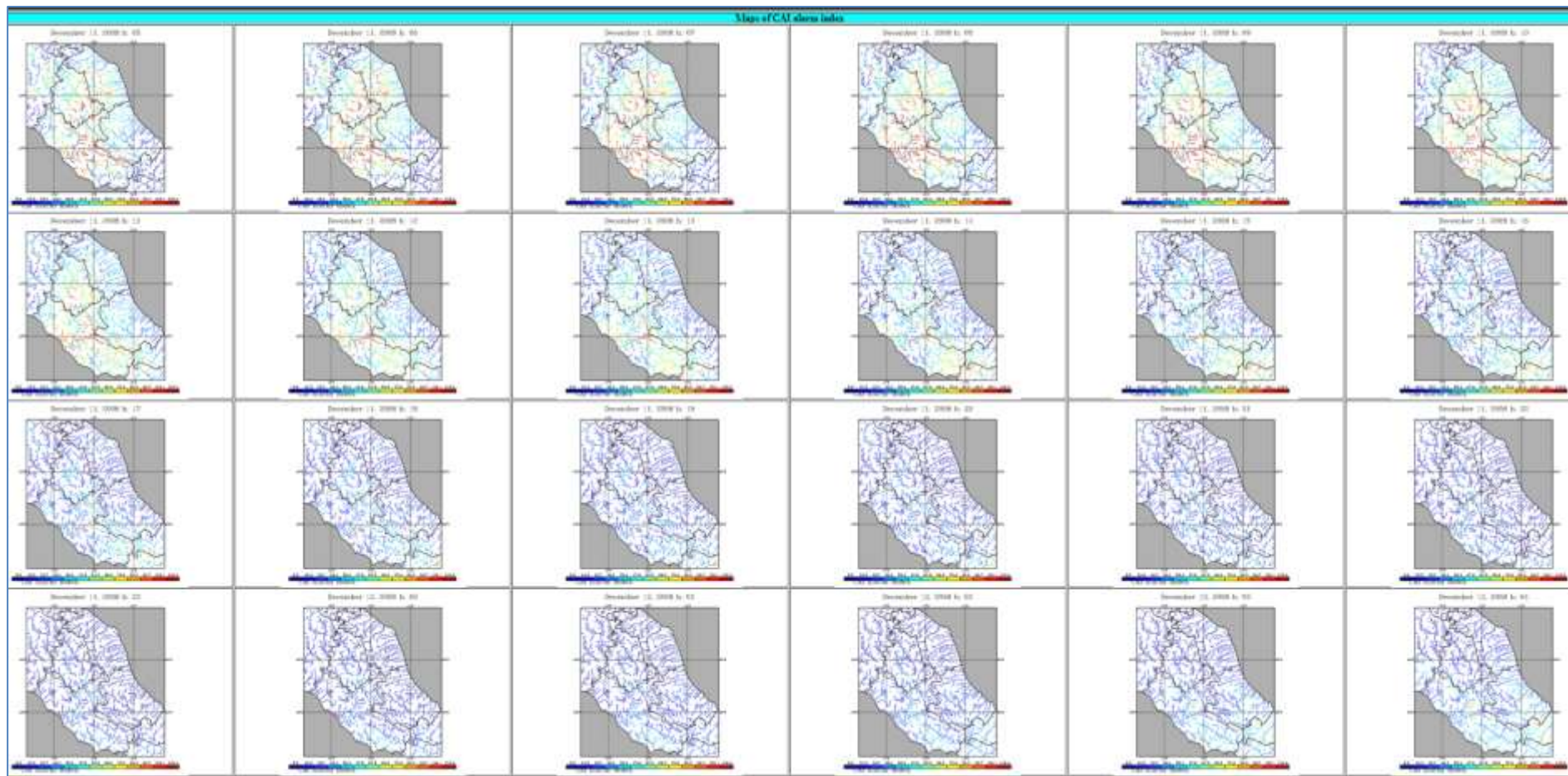


Figura 16. Sequenza delle mappe di CAI index per il caso studio dell'11-12 dicembre 2008.

| Record                             | 1     | 2     | 3    | 4    | 5    | 6     | 7     | 8    | 9   | 10  | 11   | 12  | 13  | 14    | 15    | 16    | 17   | 18  | 19    | 20  | 21   | 22  |
|------------------------------------|-------|-------|------|------|------|-------|-------|------|-----|-----|------|-----|-----|-------|-------|-------|------|-----|-------|-----|------|-----|
| ACEA Id                            | 76    | 26    | 32   | 84   | 83   | 40    | 49    | 48   | 62  | 43  | 85   | 98  | 12  | 27    | 33    | 79    | 58   | 66  | 74    | 28  | 78   | 92  |
| Distance (Km) from closest channel | 0.8   | 0.4   | 12.5 | 1.1  | 0.7  | 0.3   | 0.5   | 0.6  | 0.8 | 0.3 | 0.2  | 0.4 | 0.3 | 0.6   | 1.0   | 0.4   | 0.2  | 3.0 | 0.4   | 0.6 | 0.6  | 0.4 |
| Drained area (Km <sup>2</sup> )    | 14516 | 16953 | 101  | 1647 | 1649 | 16631 | 16563 | 1766 | 100 | 813 | 1576 | 116 | 902 | 16499 | 14676 | 16490 | 1773 | 100 | 16562 | 104 | 1446 | 159 |
| December 5, 2008 h: 13.00          | 0.3   | 0.3   | 0.1  | 0.1  | 0.1  | 0.3   | 0.3   | 0.1  | 0.0 | 0.5 | 0.1  | 0.0 | 0.5 | 0.3   | 0.3   | 0.3   | 0.1  | 0.0 | 0.3   | 0.0 | 0.2  | 0.0 |
| December 5, 2008 h: 14.00          | 0.3   | 0.3   | 0.1  | 0.2  | 0.2  | 0.3   | 0.3   | 0.1  | 0.1 | 0.7 | 0.2  | 0.1 | 0.6 | 0.3   | 0.3   | 0.3   | 0.1  | 0.1 | 0.3   | 0.0 | 0.3  | 0.1 |
| December 5, 2008 h: 15.00          | 0.3   | 0.3   | 0.1  | 0.2  | 0.2  | 0.3   | 0.3   | 0.2  | 0.2 | 1.0 | 0.2  | 0.1 | 0.9 | 0.3   | 0.3   | 0.3   | 0.2  | 0.2 | 0.3   | 0.2 | 0.4  | 0.2 |
| December 5, 2008 h: 16.00          | 0.3   | 0.3   | 0.2  | 0.3  | 0.3  | 0.3   | 0.3   | 0.2  | 0.5 | 1.3 | 0.4  | 0.3 | 1.2 | 0.3   | 0.3   | 0.3   | 0.2  | 0.5 | 0.3   | 0.3 | 0.5  | 0.4 |
| December 5, 2008 h: 17.00          | 0.3   | 0.3   | 0.5  | 0.5  | 0.5  | 0.3   | 0.3   | 0.4  | 0.4 | 1.7 | 0.6  | 0.6 | 1.7 | 0.3   | 0.3   | 0.4   | 0.4  | 0.4 | 0.3   | 0.4 | 0.7  | 0.5 |
| December 5, 2008 h: 18.00          | 0.3   | 0.3   | 0.7  | 0.6  | 0.6  | 0.4   | 0.4   | 0.5  | 0.6 | 2.3 | 0.7  | 0.6 | 2.4 | 0.4   | 0.3   | 0.4   | 0.4  | 0.6 | 0.4   | 0.6 | 0.9  | 0.7 |
| December 5, 2008 h: 19.00          | 0.4   | 0.4   | 1.1  | 0.9  | 0.8  | 0.4   | 0.4   | 0.6  | 0.6 | 3.1 | 0.9  | 0.6 | 3.1 | 0.4   | 0.4   | 0.4   | 0.6  | 0.6 | 0.4   | 0.8 | 1.2  | 0.6 |
| December 5, 2008 h: 20.00          | 0.5   | 0.4   | 1.6  | 1.1  | 1.0  | 0.4   | 0.5   | 0.8  | 0.6 | 4.0 | 1.2  | 0.6 | 3.9 | 0.5   | 0.4   | 0.5   | 0.7  | 0.6 | 0.5   | 1.1 | 1.5  | 0.5 |
| December 5, 2008 h: 21.00          | 0.6   | 0.4   | 1.9  | 1.5  | 1.4  | 0.5   | 0.5   | 0.9  | 0.5 | 4.8 | 1.6  | 0.6 | 4.6 | 0.6   | 0.5   | 0.6   | 0.8  | 0.5 | 0.5   | 1.2 | 2.0  | 0.5 |
| December 5, 2008 h: 22.00          | 0.7   | 0.5   | 2.0  | 1.9  | 1.8  | 0.5   | 0.6   | 1.2  | 0.5 | 5.3 | 2.0  | 0.5 | 5.2 | 0.7   | 0.6   | 0.7   | 1.1  | 0.5 | 0.6   | 1.1 | 2.5  | 0.5 |
| December 5, 2008 h: 23.00          | 0.9   | 0.5   | 1.8  | 2.3  | 2.2  | 0.6   | 0.7   | 1.5  | 0.4 | 5.9 | 2.4  | 0.4 | 5.8 | 0.8   | 0.7   | 0.8   | 1.4  | 0.4 | 0.7   | 1.0 | 3.1  | 0.5 |
| December 6, 2008 h: 0.00           | 1.1   | 0.5   | 1.6  | 2.7  | 2.6  | 0.7   | 0.8   | 1.9  | 0.4 | 6.6 | 2.9  | 0.2 | 6.3 | 1.0   | 0.9   | 1.0   | 1.7  | 0.4 | 0.8   | 0.8 | 3.7  | 0.6 |
| December 6, 2008 h: 1.00           | 1.3   | 0.6   | 1.4  | 3.1  | 3.0  | 0.8   | 1.0   | 2.3  | 0.3 | 7.3 | 3.3  | 0.2 | 6.7 | 1.2   | 1.1   | 1.3   | 2.1  | 0.3 | 1.0   | 0.7 | 4.2  | 0.7 |
| December 6, 2008 h: 2.00           | 1.4   | 0.7   | 1.1  | 3.6  | 3.5  | 1.0   | 1.2   | 2.7  | 0.3 | 7.9 | 3.8  | 0.1 | 7.1 | 1.5   | 1.3   | 1.5   | 2.5  | 0.3 | 1.2   | 0.6 | 4.6  | 0.9 |
| December 6, 2008 h: 3.00           | 1.5   | 0.8   | 0.9  | 4.0  | 3.9  | 1.3   | 1.4   | 3.1  | 0.2 | 8.3 | 4.2  | 0.1 | 7.6 | 1.7   | 1.4   | 1.8   | 2.9  | 0.2 | 1.5   | 0.5 | 5.0  | 1.0 |
| December 6, 2008 h: 4.00           | 1.6   | 1.0   | 0.7  | 4.4  | 4.3  | 1.5   | 1.7   | 3.5  | 0.2 | 8.4 | 4.6  | 0.1 | 7.9 | 2.0   | 1.6   | 2.0   | 3.3  | 0.2 | 1.7   | 0.4 | 5.2  | 1.1 |
| December 6, 2008 h: 5.00           | 1.7   | 1.2   | 0.5  | 4.7  | 4.6  | 1.8   | 1.9   | 3.9  | 0.1 | 8.4 | 4.8  | 0.1 | 8.1 | 2.2   | 1.6   | 2.2   | 3.7  | 0.1 | 2.0   | 0.3 | 5.4  | 1.2 |
| December 6, 2008 h: 6.00           | 1.7   | 1.4   | 0.4  | 4.9  | 4.9  | 2.0   | 2.1   | 4.2  | 0.1 | 8.4 | 5.0  | 0.1 | 8.2 | 2.3   | 1.7   | 2.4   | 4.1  | 0.1 | 2.2   | 0.3 | 5.5  | 1.3 |
| December 6, 2008 h: 7.00           | 1.7   | 1.7   | 0.2  | 5.1  | 5.0  | 2.2   | 2.3   | 4.5  | 0.1 | 8.2 | 5.2  | 0.0 | 8.1 | 2.5   | 1.7   | 2.5   | 4.4  | 0.1 | 2.3   | 0.2 | 5.7  | 1.2 |
| December 6, 2008 h: 8.00           | 1.7   | 1.9   | 0.2  | 5.2  | 5.1  | 2.4   | 2.4   | 4.7  | 0.1 | 8.0 | 5.3  | 0.0 | 8.0 | 2.6   | 1.7   | 2.6   | 4.6  | 0.1 | 2.5   | 0.2 | 5.8  | 1.2 |
| December 6, 2008 h: 9.00           | 1.7   | 2.1   | 0.1  | 5.3  | 5.3  | 2.5   | 2.5   | 4.8  | 0.0 | 7.9 | 5.4  | 0.0 | 7.8 | 2.6   | 1.7   | 2.6   | 4.8  | 0.0 | 2.6   | 0.2 | 6.0  | 1.1 |
| December 6, 2008 h: 10.00          | 1.7   | 2.3   | 0.1  | 5.4  | 5.4  | 2.6   | 2.6   | 5.0  | 0.0 | 7.7 | 5.6  | 0.0 | 7.6 | 2.7   | 1.7   | 2.7   | 4.9  | 0.0 | 2.6   | 0.2 | 6.2  | 0.9 |
| December 6, 2008 h: 11.00          | 1.8   | 2.4   | 0.0  | 5.6  | 5.5  | 2.6   | 2.6   | 5.1  | 0.0 | 7.5 | 5.8  | 0   | 7.4 | 2.7   | 1.7   | 2.7   | 5.0  | 0.0 | 2.7   | 0.1 | 6.3  | 0.8 |
| December 6, 2008 h: 12.00          | 1.9   | 2.5   | 0.0  | 5.7  | 5.7  | 2.7   | 2.7   | 5.2  | 0   | 7.3 | 5.9  | 0   | 7.3 | 2.8   | 1.8   | 2.8   | 5.1  | 0   | 2.7   | 0.1 | 6.3  | 0.7 |

Figura 17. Tabella completa del BDD index per il caso studio del 5-6 dicembre 2008 in riferimento agli elementi critici (Cabine Primarie) della rete di distribuzione ACEA-Areti.

| Record                             | 1     | 2     | 3    | 4    | 5    | 6     | 7     | 8    | 9   | 10   | 11   | 12  | 13   | 14    | 15    | 16    | 17   | 18  | 19    | 20  | 21   | 22  |
|------------------------------------|-------|-------|------|------|------|-------|-------|------|-----|------|------|-----|------|-------|-------|-------|------|-----|-------|-----|------|-----|
| ACEA Id                            | 76    | 26    | 32   | 84   | 83   | 40    | 49    | 48   | 62  | 43   | 85   | 98  | 12   | 27    | 33    | 79    | 58   | 66  | 74    | 28  | 78   | 92  |
| Distance (Km) from closest channel | 0.8   | 0.4   | 12.5 | 1.1  | 0.7  | 0.3   | 0.5   | 0.6  | 0.8 | 0.3  | 0.2  | 0.4 | 0.3  | 0.6   | 1.0   | 0.4   | 0.2  | 3.0 | 0.4   | 0.6 | 0.6  | 0.4 |
| Drained area (Km <sup>2</sup> )    | 14516 | 16953 | 101  | 1647 | 1649 | 16631 | 16563 | 1766 | 100 | 813  | 1576 | 116 | 902  | 16499 | 14676 | 16490 | 1773 | 100 | 16562 | 104 | 1446 | 159 |
| December 11, 2008 h: 5.00          | 2.6   | 1.5   | 7.2  | 4.1  | 3.8  | 1.8   | 2.0   | 2.8  | 4.2 | 4.7  | 4.3  | 6.0 | 4.8  | 2.3   | 2.3   | 2.4   | 2.6  | 4.2 | 2.1   | 3.0 | 4.4  | 2.9 |
| December 11, 2008 h: 6.00          | 3.2   | 1.9   | 8.6  | 5.2  | 4.9  | 2.3   | 2.5   | 4.0  | 5.1 | 5.6  | 5.4  | 6.8 | 5.4  | 2.9   | 2.8   | 3.0   | 3.7  | 5.1 | 2.6   | 3.7 | 5.6  | 3.1 |
| December 11, 2008 h: 7.00          | 3.7   | 2.4   | 9.3  | 6.4  | 6.1  | 2.8   | 3.0   | 5.1  | 5.5 | 6.4  | 6.5  | 7.3 | 6.1  | 3.5   | 3.3   | 3.7   | 4.8  | 5.5 | 3.1   | 4.1 | 7.0  | 3.3 |
| December 11, 2008 h: 8.00          | 4.3   | 2.9   | 9.5  | 7.6  | 7.3  | 3.4   | 3.7   | 6.3  | 6.0 | 7.4  | 7.7  | 7.7 | 7.3  | 4.2   | 3.9   | 4.4   | 6.0  | 6.0 | 3.8   | 4.6 | 8.5  | 3.6 |
| December 11, 2008 h: 9.00          | 4.8   | 3.4   | 9.8  | 8.9  | 8.6  | 4.1   | 4.4   | 7.5  | 5.8 | 8.6  | 9.0  | 7.7 | 8.4  | 5.0   | 4.5   | 5.2   | 7.1  | 5.8 | 4.5   | 4.7 | 9.7  | 3.5 |
| December 11, 2008 h: 10.00         | 5.3   | 3.9   | 9.6  | 10.2 | 9.9  | 4.7   | 5.1   | 8.7  | 5.5 | 9.7  | 10.2 | 7.1 | 9.0  | 5.8   | 5.0   | 6.0   | 8.2  | 5.5 | 5.2   | 4.6 | 10.8 | 3.6 |
| December 11, 2008 h: 11.00         | 5.8   | 4.5   | 9.2  | 11.3 | 11.0 | 5.5   | 5.8   | 9.0  | 5.2 | 10.2 | 11.2 | 6.2 | 9.7  | 6.5   | 5.5   | 6.7   | 9.4  | 5.2 | 6.0   | 4.3 | 11.6 | 3.7 |
| December 11, 2008 h: 12.00         | 6.2   | 5.1   | 8.0  | 12.1 | 11.9 | 6.2   | 6.6   | 11.0 | 4.8 | 10.6 | 11.8 | 5.4 | 10.4 | 7.3   | 6.0   | 7.5   | 10.6 | 4.8 | 6.7   | 3.9 | 12.1 | 3.8 |
| December 11, 2008 h: 13.00         | 6.5   | 5.7   | 6.7  | 11.5 | 12.4 | 6.9   | 7.3   | 12.0 | 4.3 | 10.9 | 12.2 | 4.7 | 10.9 | 8.0   | 6.3   | 8.1   | 11.6 | 4.3 | 7.4   | 3.4 | 12.2 | 3.9 |
| December 11, 2008 h: 14.00         | 6.7   | 6.4   | 5.6  | 12.6 | 12.6 | 7.6   | 7.9   | 12.7 | 3.8 | 11.1 | 12.7 | 4.1 | 11.1 | 8.5   | 6.6   | 8.7   | 12.4 | 3.8 | 8.1   | 3.0 | 12.7 | 4.0 |
| December 11, 2008 h: 15.00         | 6.9   | 7.0   | 4.7  | 12.6 | 12.6 | 8.2   | 8.5   | 13.0 | 3.4 | 11.2 | 12.1 | 3.7 | 11.2 | 9.0   | 6.8   | 9.1   | 12.9 | 3.4 | 8.6   | 2.5 | 12.0 | 4.1 |
| December 11, 2008 h: 16.00         | 7.0   | 7.7   | 4.1  | 12.4 | 12.4 | 8.7   | 9.0   | 13.0 | 2.9 | 11.2 | 11.9 | 3.2 | 11.2 | 9.3   | 7.0   | 9.4   | 13.0 | 2.9 | 9.0   | 2.2 | 11.8 | 4.2 |
| December 11, 2008 h: 17.00         | 7.1   | 8.3   | 3.4  | 12.2 | 12.2 | 9.1   | 9.3   | 12.9 | 2.6 | 11.2 | 11.7 | 2.8 | 11.2 | 9.5   | 7.1   | 9.5   | 12.9 | 2.6 | 9.3   | 1.9 | 11.7 | 4.2 |
| December 11, 2008 h: 18.00         | 7.2   | 8.8   | 2.8  | 11.9 | 12.0 | 9.4   | 9.5   | 12.8 | 2.3 | 11.2 | 11.5 | 2.4 | 11.1 | 9.6   | 7.2   | 9.6   | 12.7 | 2.3 | 9.5   | 1.7 | 11.6 | 4.1 |
| December 11, 2008 h: 19.00         | 7.3   | 9.2   | 2.3  | 11.6 | 11.7 | 9.6   | 9.6   | 12.3 | 2.0 | 11.1 | 11.2 | 2.1 | 10.9 | 9.6   | 7.3   | 9.6   | 12.4 | 2.0 | 9.6   | 1.6 | 11.3 | 3.9 |
| December 11, 2008 h: 20.00         | 7.3   | 9.5   | 1.8  | 11.4 | 11.4 | 9.6   | 9.6   | 11.9 | 1.7 | 11.1 | 11.0 | 1.7 | 10.8 | 9.6   | 7.3   | 9.6   | 12.1 | 1.7 | 9.6   | 1.5 | 11.1 | 3.6 |
| December 11, 2008 h: 21.00         | 7.4   | 9.6   | 1.5  | 11.1 | 11.2 | 9.6   | 9.6   | 11.6 | 1.5 | 11.2 | 10.8 | 1.4 | 10.8 | 9.6   | 7.4   | 9.6   | 11.7 | 1.5 | 9.6   | 1.3 | 10.8 | 3.3 |
| December 11, 2008 h: 22.00         | 7.5   | 9.7   | 1.3  | 10.8 | 10.9 | 9.6   | 9.6   | 11.3 | 1.3 | 11.1 | 10.5 | 1.2 | 10.7 | 9.5   | 7.4   | 9.5   | 11.4 | 1.3 | 9.6   | 1.2 | 10.5 | 2.9 |
| December 11, 2008 h: 23.00         | 7.6   | 9.7   | 1.2  | 10.4 | 10.5 | 9.6   | 9.5   | 10.9 | 1.2 | 10.9 | 10.3 | 1.0 | 10.6 | 9.5   | 7.5   | 9.5   | 11.0 | 1.2 | 9.5   | 1.1 | 10.2 | 2.6 |
| December 12, 2008 h: 0.00          | 7.7   | 9.7   | 1.1  | 10.1 | 10.2 | 9.6   | 9.5   | 10.6 | 1.1 | 10.5 | 10.0 | 0.8 | 10.5 | 9.5   | 7.6   | 9.5   | 10.7 | 1.1 | 9.5   | 1.1 | 9.9  | 2.3 |
| December 12, 2008 h: 1.00          | 7.9   | 9.6   | 1.1  | 9.8  | 9.9  | 9.5   | 9.5   | 10.3 | 1.1 | 10.1 | 9.8  | 0.8 | 10.4 | 9.5   | 7.7   | 9.5   | 10.4 | 1.1 | 9.5   | 1.1 | 9.7  | 2.0 |
| December 12, 2008 h: 2.00          | 8.0   | 9.6   | 1.4  | 9.6  | 9.6  | 9.5   | 9.5   | 9.9  | 1.0 | 9.6  | 9.5  | 0.7 | 10.3 | 9.6   | 7.9   | 9.6   | 10.0 | 1.0 | 9.5   | 1.1 | 9.5  | 1.7 |
| December 12, 2008 h: 3.00          | 8.2   | 9.6   | 1.7  | 9.4  | 9.4  | 9.5   | 9.5   | 9.6  | 1.0 | 9.0  | 9.4  | 0.7 | 10.0 | 9.6   | 8.0   | 9.6   | 9.7  | 1.0 | 9.6   | 1.1 | 9.5  | 1.5 |
| December 12, 2008 h: 4.00          | 8.4   | 9.6   | 1.9  | 9.3  | 9.3  | 9.6   | 9.6   | 9.4  | 1.2 | 8.3  | 9.4  | 0.8 | 9.5  | 9.7   | 8.2   | 9.7   | 9.5  | 1.2 | 9.6   | 1.2 | 9.6  | 1.5 |

Figura 18. Tabella completa del BDD index per il caso studio dell'11-12 dicembre 2008 in riferimento agli elementi critici (Cabine Primarie) della rete di distribuzione ACEA-Areti.



| Record                             | 1     | 2     | 3    | 4    | 5    | 6     | 7     | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   | 13   | 14    | 15    | 16    | 17   | 18   | 19    | 20   | 21   | 22   |
|------------------------------------|-------|-------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|------|------|-------|------|------|------|
| ACEA Id                            | 76    | 26    | 32   | 84   | 83   | 40    | 49    | 48   | 62   | 43   | 85   | 98   | 12   | 27    | 33    | 79    | 58   | 66   | 74    | 28   | 78   | 92   |
| Distance (Km) from closest channel | 0.8   | 0.4   | 12.5 | 1.1  | 0.7  | 0.3   | 0.5   | 0.6  | 0.8  | 0.3  | 0.2  | 0.4  | 0.3  | 0.6   | 1.0   | 0.4   | 0.2  | 3.0  | 0.4   | 0.6  | 0.6  | 0.4  |
| Drained area (Km <sup>2</sup> )    | 14516 | 16953 | 101  | 1647 | 1649 | 16631 | 16563 | 1766 | 100  | 813  | 1576 | 116  | 902  | 16499 | 14676 | 16490 | 1773 | 100  | 16562 | 104  | 1446 | 159  |
| December 5, 2008 h: 13.00          | 7.0   | 6.1   | 13.9 | 10.9 | 10.9 | 6.5   | 6.5   | 9.9  | 7.2  | 18.0 | 11.2 | 3.8  | 16.9 | 6.7   | 6.8   | 6.8   | 9.4  | 7.2  | 6.6   | 12.9 | 11.7 | 10.6 |
| December 5, 2008 h: 14.00          | 8.8   | 7.7   | 17.8 | 13.7 | 13.7 | 8.2   | 8.2   | 12.5 | 6.5  | 22.3 | 14.0 | 3.5  | 20.8 | 8.4   | 8.6   | 8.6   | 11.8 | 6.5  | 8.4   | 13.8 | 14.7 | 13.3 |
| December 5, 2008 h: 15.00          | 11.2  | 9.8   | 32.7 | 19.9 | 19.9 | 10.4  | 10.4  | 18.1 | 11.3 | 31.3 | 20.4 | 4.7  | 29.7 | 10.7  | 10.8  | 11.0  | 17.1 | 11.3 | 10.7  | 20.7 | 21.5 | 20.8 |
| December 5, 2008 h: 16.00          | 13.7  | 12.2  | 43.6 | 25.6 | 25.5 | 12.9  | 12.9  | 23.4 | 23.3 | 39.7 | 26.1 | 15.4 | 37.3 | 13.3  | 13.4  | 13.6  | 22.1 | 23.3 | 13.2  | 27.6 | 27.3 | 31.0 |
| December 5, 2008 h: 17.00          | 16.6  | 14.8  | 61.7 | 33.1 | 33.1 | 15.7  | 15.7  | 30.4 | 33.0 | 47.9 | 33.6 | 32.4 | 45.1 | 16.1  | 16.1  | 16.5  | 28.8 | 33.0 | 16.1  | 36.5 | 34.7 | 36.5 |
| December 5, 2008 h: 18.00          | 18.5  | 16.8  | 78.6 | 41.0 | 41.0 | 17.7  | 17.8  | 38.1 | 43.9 | 59.3 | 41.8 | 40.6 | 56.2 | 18.2  | 18.0  | 18.7  | 36.0 | 43.9 | 18.2  | 48.9 | 43.1 | 47.1 |
| December 5, 2008 h: 19.00          | 19.5  | 18.0  | 92.4 | 49.9 | 49.9 | 19.0  | 19.0  | 46.3 | 49.2 | 71.8 | 50.8 | 50.0 | 67.7 | 19.5  | 19.0  | 20.0  | 44.1 | 49.2 | 19.5  | 48.9 | 52.2 | 48.9 |
| December 5, 2008 h: 20.00          | 20.1  | 18.7  | 92.7 | 57.3 | 57.2 | 19.8  | 19.8  | 52.8 | 50.4 | 85.7 | 58.4 | 50.7 | 80.3 | 20.3  | 19.5  | 20.8  | 50.3 | 50.4 | 20.3  | 48.7 | 60.4 | 47.5 |
| December 5, 2008 h: 21.00          | 20.3  | 19.1  | 79.9 | 59.8 | 59.8 | 20.1  | 20.2  | 55.2 | 49.9 | 90.7 | 61.0 | 50.5 | 85.3 | 20.7  | 19.8  | 21.2  | 52.5 | 49.9 | 20.6  | 49.1 | 63.2 | 46.4 |
| December 5, 2008 h: 22.00          | 20.5  | 19.2  | 68.8 | 60.5 | 60.5 | 20.3  | 20.3  | 55.6 | 47.5 | 91.7 | 61.8 | 49.1 | 86.2 | 20.8  | 19.9  | 21.4  | 53.0 | 47.5 | 20.8  | 49.2 | 64.0 | 47.1 |
| December 5, 2008 h: 23.00          | 20.7  | 19.4  | 47.5 | 60.5 | 60.5 | 20.5  | 20.5  | 55.6 | 41.2 | 91.4 | 61.8 | 38.4 | 85.4 | 21.1  | 20.2  | 21.6  | 52.9 | 41.2 | 21.0  | 48.7 | 64.1 | 47.1 |
| December 6, 2008 h: 0.00           | 20.9  | 19.6  | 30.1 | 60.3 | 60.3 | 20.7  | 20.7  | 55.8 | 29.2 | 91.3 | 61.7 | 21.6 | 85.5 | 21.3  | 20.4  | 21.8  | 53.0 | 29.2 | 21.2  | 46.7 | 63.9 | 46.2 |
| December 6, 2008 h: 1.00           | 21.0  | 19.7  | 10.6 | 59.9 | 59.9 | 20.8  | 20.8  | 55.5 | 18.1 | 91.3 | 61.3 | 13.1 | 85.8 | 21.3  | 20.4  | 21.9  | 53.2 | 18.1 | 21.3  | 38.5 | 63.6 | 43.5 |
| December 6, 2008 h: 2.00           | 21.0  | 19.7  | 5.0  | 59.7 | 59.7 | 20.8  | 20.9  | 54.9 | 7.0  | 88.2 | 61.1 | 3.6  | 85.3 | 21.4  | 20.5  | 21.9  | 52.7 | 7.0  | 21.3  | 27.3 | 63.4 | 35.4 |
| December 6, 2008 h: 3.00           | 21.1  | 19.7  | 2.7  | 59.5 | 59.5 | 20.9  | 20.9  | 54.7 | 1.6  | 83.9 | 60.9 | 1.0  | 82.4 | 21.4  | 20.5  | 21.9  | 52.1 | 1.6  | 21.4  | 17.3 | 63.1 | 24.7 |
| December 6, 2008 h: 4.00           | 21.1  | 19.8  | 2.7  | 58.7 | 58.7 | 20.9  | 21.0  | 54.4 | 0.4  | 79.7 | 60.1 | 0.4  | 77.9 | 21.5  | 20.6  | 22.0  | 51.8 | 0.4  | 21.5  | 4.8  | 62.3 | 15.0 |
| December 6, 2008 h: 5.00           | 21.2  | 19.9  | 1.5  | 56.8 | 56.8 | 21.0  | 21.0  | 53.6 | 0.4  | 70.0 | 58.1 | 0.3  | 73.9 | 21.6  | 20.7  | 22.1  | 51.4 | 0.4  | 21.5  | 2.8  | 60.2 | 3.9  |
| December 6, 2008 h: 6.00           | 21.4  | 20.0  | 0.7  | 53.7 | 53.7 | 21.1  | 21.2  | 51.9 | 0.3  | 60.7 | 54.9 | 0.2  | 65.0 | 21.7  | 20.8  | 22.2  | 50.7 | 0.3  | 21.7  | 1.6  | 56.9 | 2.1  |
| December 6, 2008 h: 7.00           | 21.5  | 20.1  | 0.5  | 51.0 | 50.9 | 21.2  | 21.3  | 49.1 | 0.3  | 51.8 | 52.1 | 0.0  | 56.7 | 21.8  | 20.9  | 22.3  | 49.2 | 0.3  | 21.8  | 1.2  | 54.0 | 1.5  |
| December 6, 2008 h: 8.00           | 21.6  | 20.2  | 0.3  | 44.7 | 44.7 | 21.3  | 21.4  | 46.6 | 0.1  | 39.4 | 45.6 | 0.0  | 48.2 | 21.9  | 21.0  | 22.5  | 46.5 | 0.1  | 21.9  | 0.9  | 47.2 | 1.3  |
| December 6, 2008 h: 9.00           | 21.7  | 20.3  | 0.3  | 39.3 | 39.2 | 21.4  | 21.5  | 41.1 | 0.1  | 26.6 | 40.1 | 0    | 36.7 | 22.0  | 21.1  | 22.6  | 44.2 | 0.1  | 22.0  | 0.6  | 41.5 | 0.6  |
| December 6, 2008 h: 10.00          | 21.9  | 20.4  | 0.3  | 32.2 | 32.2 | 21.6  | 21.6  | 36.3 | 0.1  | 13.3 | 33.1 | 0.0  | 25.1 | 22.2  | 21.3  | 22.7  | 39.3 | 0.1  | 22.1  | 0.3  | 34.7 | 0.3  |
| December 6, 2008 h: 11.00          | 22.0  | 20.5  | 0.3  | 24.3 | 24.3 | 21.7  | 21.7  | 29.6 | 0.1  | 8.4  | 25.0 | 0.0  | 12.9 | 22.3  | 21.4  | 22.8  | 34.7 | 0.1  | 22.3  | 0.3  | 26.3 | 0.2  |
| December 6, 2008 h: 12.00          | 22.3  | 20.8  | 0.3  | 15.2 | 15.1 | 22.0  | 22.1  | 22.0 | 0.1  | 6.5  | 15.7 | 0.0  | 7.8  | 22.6  | 21.7  | 23.2  | 28.0 | 0.1  | 22.6  | 0.3  | 16.9 | 0.2  |

Figura 19. Tabella completa del CAI index per il caso studio del 5-6 dicembre 2008 in riferimento agli elementi critici (Cabine Primarie) della rete di distribuzione ACEA-Areti.

| Record                             | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8    | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    | 17   | 18    | 19    | 20    | 21    | 22    |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ACEA Id                            | 76    | 26    | 32    | 84    | 83    | 40    | 49    | 48   | 62    | 43    | 85    | 98    | 12    | 27    | 33    | 79    | 58   | 66    | 74    | 28    | 78    | 92    |
| Distance (Km) from closest channel | 0.8   | 0.4   | 12.5  | 1.1   | 0.7   | 0.3   | 0.5   | 0.6  | 0.8   | 0.3   | 0.2   | 0.4   | 0.3   | 0.6   | 1.0   | 0.4   | 0.2  | 3.0   | 0.4   | 0.6   | 0.6   | 0.4   |
| Drained area (Km <sup>2</sup> )    | 14516 | 16953 | 101   | 1647  | 1649  | 16631 | 16563 | 1766 | 100   | 813   | 1576  | 116   | 902   | 16499 | 14676 | 16490 | 1773 | 100   | 16562 | 104   | 1446  | 159   |
| December 11, 2008 h: 5.00          | 29.9  | 28.6  | 183.4 | 73.5  | 73.5  | 29.9  | 29.8  | 70.7 | 129.2 | 79.3  | 73.3  | 141.2 | 75.3  | 30.5  | 29.2  | 31.2  | 69.1 | 126.2 | 30.5  | 78.9  | 73.2  | 73.5  |
| December 11, 2008 h: 6.00          | 31.5  | 30.3  | 184.8 | 76.2  | 76.2  | 31.6  | 31.5  | 74.5 | 147.2 | 83.7  | 75.8  | 139.3 | 79.2  | 32.2  | 30.8  | 33.0  | 71.6 | 147.2 | 32.2  | 82.4  | 75.6  | 83.1  |
| December 11, 2008 h: 7.00          | 33.3  | 32.1  | 182.4 | 82.1  | 82.1  | 33.4  | 33.4  | 80.3 | 157.2 | 89.2  | 81.6  | 146.6 | 84.8  | 34.1  | 32.5  | 35.0  | 77.5 | 157.2 | 34.2  | 89.3  | 81.0  | 80.9  |
| December 11, 2008 h: 8.00          | 35.1  | 34.0  | 180.8 | 90.2  | 90.2  | 35.4  | 35.3  | 87.2 | 164.7 | 97.2  | 89.8  | 159.9 | 92.7  | 36.1  | 34.3  | 37.0  | 84.2 | 164.7 | 36.2  | 112.0 | 89.4  | 102.8 |
| December 11, 2008 h: 9.00          | 37.1  | 35.9  | 187.9 | 97.3  | 97.3  | 37.5  | 37.4  | 93.9 | 175.9 | 107.9 | 97.1  | 163.3 | 102.0 | 38.2  | 36.2  | 39.2  | 89.5 | 175.9 | 38.3  | 116.1 | 97.0  | 103.7 |
| December 11, 2008 h: 10.00         | 38.3  | 37.0  | 92.0  | 98.0  | 98.0  | 38.6  | 38.5  | 84.4 | 128.7 | 108.9 | 97.8  | 110.3 | 103.2 | 39.4  | 37.4  | 40.3  | 90.0 | 128.7 | 39.4  | 108.4 | 97.8  | 104.4 |
| December 11, 2008 h: 11.00         | 38.7  | 37.3  | 84.6  | 97.7  | 97.7  | 38.9  | 38.9  | 84.3 | 84.3  | 110.9 | 97.3  | 98.1  | 104.7 | 39.8  | 37.8  | 40.7  | 90.3 | 84.3  | 39.8  | 98.1  | 97.3  | 98.9  |
| December 11, 2008 h: 12.00         | 38.9  | 37.6  | 80.2  | 98.0  | 98.0  | 39.2  | 39.1  | 84.7 | 69.1  | 112.0 | 97.8  | 87.9  | 106.5 | 40.0  | 38.0  | 41.0  | 91.1 | 69.1  | 40.1  | 84.7  | 97.9  | 90.7  |
| December 11, 2008 h: 13.00         | 39.2  | 37.9  | 50.6  | 99.6  | 99.7  | 39.5  | 39.5  | 85.1 | 56.1  | 109.6 | 99.3  | 49.4  | 107.8 | 40.4  | 38.3  | 41.4  | 91.7 | 56.1  | 40.4  | 62.7  | 99.6  | 61.0  |
| December 11, 2008 h: 14.00         | 39.4  | 38.2  | 29.4  | 109.9 | 109.9 | 39.8  | 39.8  | 86.6 | 35.4  | 102.0 | 100.5 | 22.5  | 105.3 | 40.7  | 38.5  | 41.7  | 92.0 | 35.4  | 40.7  | 52.5  | 100.9 | 60.8  |
| December 11, 2008 h: 15.00         | 39.6  | 38.4  | 18.8  | 101.3 | 101.3 | 40.0  | 40.0  | 87.3 | 25.0  | 83.6  | 101.1 | 6.9   | 97.3  | 40.9  | 38.7  | 41.9  | 92.8 | 25.0  | 40.9  | 43.2  | 101.3 | 48.1  |
| December 11, 2008 h: 16.00         | 39.8  | 38.6  | 21.5  | 98.7  | 98.7  | 40.3  | 40.2  | 87.9 | 9.1   | 86.5  | 98.1  | 3.6   | 89.3  | 41.1  | 38.9  | 42.1  | 93.2 | 9.1   | 41.2  | 30.1  | 98.4  | 38.5  |
| December 11, 2008 h: 17.00         | 40.2  | 38.9  | 22.7  | 91.8  | 91.9  | 40.6  | 40.6  | 85.0 | 6.3   | 80.2  | 91.1  | 3.4   | 82.6  | 41.5  | 39.3  | 42.4  | 93.3 | 6.3   | 41.5  | 23.6  | 91.3  | 29.2  |
| December 11, 2008 h: 18.00         | 40.4  | 39.1  | 20.4  | 84.9  | 84.9  | 40.8  | 40.8  | 88.2 | 6.5   | 64.9  | 84.2  | 3.8   | 75.6  | 41.6  | 39.5  | 42.5  | 90.1 | 6.5   | 41.7  | 9.7   | 84.2  | 21.4  |
| December 11, 2008 h: 19.00         | 40.3  | 39.2  | 16.0  | 73.5  | 73.5  | 40.8  | 40.8  | 81.5 | 6.8   | 52.2  | 73.3  | 5.6   | 61.1  | 41.6  | 39.5  | 42.2  | 83.7 | 6.8   | 41.6  | 6.4   | 74.0  | 9.5   |
| December 11, 2008 h: 20.00         | 40.0  | 39.3  | 15.2  | 64.8  | 64.8  | 40.7  | 40.7  | 70.6 | 5.0   | 46.9  | 65.1  | 5.8   | 48.9  | 41.2  | 39.4  | 41.5  | 77.8 | 5.0   | 41.3  | 6.4   | 66.6  | 7.9   |
| December 11, 2008 h: 21.00         | 39.3  | 39.3  | 13.8  | 51.0  | 51.0  | 40.5  | 40.4  | 61.4 | 3.3   | 39.9  | 51.1  | 6.4   | 44.0  | 40.6  | 39.1  | 40.9  | 67.8 | 3.3   | 40.7  | 6.4   | 51.9  | 7.0   |
| December 11, 2008 h: 22.00         | 38.6  | 39.2  | 12.6  | 42.2  | 42.2  | 39.8  | 39.8  | 48.4 | 3.5   | 29.3  | 42.3  | 7.2   | 37.4  | 39.9  | 38.5  | 40.1  | 58.4 | 3.5   | 40.0  | 6.2   | 42.5  | 5.9   |
| December 11, 2008 h: 23.00         | 37.7  | 38.8  | 12.5  | 38.2  | 38.1  | 39.1  | 39.1  | 40.0 | 5.4   | 18.0  | 38.4  | 8.2   | 27.2  | 39.1  | 37.7  | 39.0  | 46.0 | 5.4   | 39.2  | 4.5   | 38.7  | 6.0   |
| December 12, 2008 h: 0.00          | 36.6  | 38.3  | 18.4  | 31.4  | 31.3  | 38.4  | 38.4  | 36.1 | 7.9   | 15.3  | 31.7  | 9.6   | 16.9  | 38.2  | 36.9  | 37.6  | 38.7 | 7.9   | 38.2  | 5.3   | 32.1  | 5.5   |
| December 12, 2008 h: 1.00          | 35.2  | 37.9  | 29.3  | 24.8  | 24.8  | 37.7  | 37.6  | 31.3 | 13.0  | 14.1  | 25.0  | 12.3  | 15.8  | 37.0  | 36.0  | 36.4  | 36.4 | 13.0  | 37.1  | 10.0  | 25.3  | 9.2   |
| December 12, 2008 h: 2.00          | 34.0  | 37.6  | 34.7  | 20.5  | 20.5  | 36.8  | 36.7  | 26.1 | 14.4  | 15.3  | 20.6  | 10.7  | 17.2  | 36.0  | 34.8  | 35.5  | 32.7 | 14.4  | 36.1  | 12.0  | 20.7  | 11.0  |
| December 12, 2008 h: 3.00          | 33.1  | 37.3  | 36.1  | 22.4  | 22.4  | 36.0  | 35.9  | 22.0 | 16.1  | 16.8  | 22.5  | 11.9  | 18.8  | 35.3  | 33.9  | 34.9  | 27.6 | 16.1  | 35.4  | 13.9  | 22.6  | 12.5  |
| December 12, 2008 h: 4.00          | 32.5  | 36.7  | 45.2  | 24.8  | 24.8  | 35.4  | 35.4  | 24.1 | 22.6  | 18.2  | 24.8  | 17.6  | 19.7  | 34.9  | 33.1  | 34.5  | 24.0 | 22.6  | 35.0  | 18.4  | 24.8  | 16.6  |

Figura 20. Tabella completa del CAI index per il caso studio dell'11-12 dicembre 2008 in riferimento agli elementi critici (Cabine Primarie) della rete di distribuzione ACEA-Areti.

### 3 Conclusioni

Il sistema sviluppato e descritto nel presente Report precedenti rende possibile prevedere, in modalità operativa, lo stato di stress sulla rete idrologica del bacino del Tevere e, più specificatamente, la possibilità di situazioni critiche per elementi strategici della rete elettrica gestita da ACEA-Areti. Inoltre, i risultati hanno mostrato come il sistema CIPCast (grazie ai dati provenienti dal modello CHyM) sarebbe effettivamente in grado di generare un'efficace allerta con almeno un giorno di anticipo ed evidenziare i segmenti della rete drenante e le zone degli elementi della rete elettrica che possono essere soggetti a situazioni di stress o criticità.

Come detto in precedenza, ai fini di un ulteriore sviluppo applicativo delle suddette elaborazioni, sarebbe assai utile simulare ed analizzare i risultati per un congruo numero di casi studio, in maniera da fornire al gruppo di lavoro del Laboratorio DTE-SEN-APIC dell'ENEA e – soprattutto - ai responsabili e tecnici di Areti un significativo numero di test su cui valutare l'utilità dell'approccio implementato e suggerire ulteriori studi e raffinamenti del sistema proposto.

Si sottolinea inoltre che, sebbene gli obiettivi del progetto prevedessero sostanzialmente uno studio preliminare, la realizzazione del progetto stesso è andata oltre gli scopi strettamente previsti, arrivando a realizzare, di fatto, ad un *tool* operativo che può già essere utilizzato per la previsioni di rischio su elementi specifici (come, ad esempio, le Cabine Principali) della rete gestita da Areti. Considerando questo stato avanzato nella realizzazione delle attività definite nel presente Accordo di Collaborazione, non si può non auspicare che esso possa dare luogo a futuri sviluppi, sia dal punto di vista di ulteriori miglioramenti ed affinamenti, sia dal punto di vista del suo effettivo utilizzo.

Il sistema di previsione idrologica e di allarme è inoltre facilmente esportabile ad altre realtà urbane e non: in particolare, la specificità del modello di allarme riferito ad obiettivi sensibili, costituisce un approccio sicuramente innovativo e all'avanguardia che varrà la pena di proporre per altre applicazioni analoghe, anche estese su tutto il territorio nazionale.

## 4 Riferimenti bibliografici

1. E. Coppola, B. Tomassetti, L. Mariotti, M. Verdecchia, G. Visconti, "Cellular automata algorithms for drainage network extraction and rainfall data assimilation", 52(3), *Hydrol. Sci. J.*, (2007), pp. 579-592.
2. E. Coppola, M. Verdecchia, F. Giorgi, V. Colaiuda, B. Tomassetti, A. Lombardi, " Changing hydrological conditions in the Po basin under global warming", *Sci. Total Environ*, 493 (2014), pp. 1183-1196.
3. F. S. Marzano, M. Palmacci, D. Cimini, G. Giuliani and J. F. Turk, "Multivariate Statistical Integration of Satellite Infrared and Microwave Radiometric Measurements for Rainfall Retrieval at the Geostationary Scale", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, n. 42(5) (2004), pp. 1018-1032.
4. Packard, N. H., Wolfram, S., "Two-dimensional cellular automata", 38, *J. Statist. Phys.*, (1985), pp. 901-946.
5. Tomassetti B., E. Coppola, M. Verdecchia, and G. Visconti, "Coupling a distributed grid based hydrological model and MM5 meteorological model for flooding alert mapping", *Adv. Geosci.*, 2 (2005), pp. 59-63.
6. Verdecchia M., E. Coppola, C. Faccani, R. Ferretti, A. Memmo, M. Montopoli, G. Rivolta, T. Paolucci, E. Picciotti, A. Santacasa, B. Tomassetti, G. Visconti and F. S. Marzano, Flood forecast in complex orography coupling distributed hydrometeorological models and in-situ and remote sensing data, *Meteorol. Atmos. Phys.*, 101, pp. 267-285, 2008.

## 5 Abbreviazioni ed acronimi

CA – Cellular Automata o Automi Cellulari

BDD - Best Discharge-based Drainage alarm index

CAI - CHyM Alarm Index

CETEMPS - Centro di Eccellenza per l'integrazione di Tecniche di Telerilevamento e Modellistica Numerica per la Previsione di Eventi Meteorologici Severi

DEM - Digital Elevation Model ovvero Modello di Elevazione del Territorio

DSFC – Dipartimento di Scienze Fisiche e Chimiche dell'Università dell'Aquila

ECMWF - European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

MM5 – Mesoscale Model versione 5, modello meteorologico sviluppato negli stati uniti

MODIS – MODerate resolution Imaging Spectroradiometer

NCEP - National Centers for Environmental Prediction

SRTM - Shuttle Radar Topography Mission

WRF - Weather Research and Forecasting Model, modello meteorologico.

## 6 Curriculum scientifico dei partecipanti

### **Marco Verdecchia**

Marco Verdecchia è nato a Giulianova (TE) il 20 giugno 1960.

Si è laureato in Fisica col massimo dei voti nel 1986 presso l'Università degli studi dell'Aquila discutendo una tesi sugli effetti delle eruzioni vulcaniche in stratosfera.

Dal 2000 ricopre il posto di ricercatore confermato, settore scientifico disciplinare FIS/06 presso l'Università degli Studi di L'Aquila.

Dal 2002 al 2016 è stato responsabile del Gruppo di Modellistica Idrologica del Centro di Eccellenza CETEMPS dell'Università dell'Aquila ed è stato tra gli autori del proposal per la creazione dello stesso Centro di Eccellenza.

Dal 2008 al 2013 è stato responsabile della unità di ricerca dell'Università dell'Aquila per il progetto FP7 Integrated project ACQWA "Assessing Climate change impacts on the Quantity and Quality of Water"

Dal 2000 ad oggi è stato titolare dei corsi di Fisica Generale e Metodi computazionali in vari corsi di Laurea presso l'Università degli studi dell'Aquila.

Ha trascorso lunghi periodi di lavoro e di studio all'estero, principalmente presso il National Center for Atmospheric Research (NCAR) di Boulder, in Colorado e presso il Centro Europeo per la Ricerca Nucleare (CERN) di Ginevra.

E' autore e coautore di circa 50 pubblicazioni su riviste scientifiche internazionali, principalmente nel campo della Fisica delle Alte Energie, Fisica dell'Atmosfera ed Idrologia. I suoi principali campi di interesse riguardano lo sviluppo di modelli numerici per sistemi complessi. E' specializzato in particolare nell'applicazione di algoritmi biologici: reti neurali, automi cellulari, algoritmi genetici.

### **Barbara Tomassetti**

Barbara Tomassetti è nata a Chieti il 26 gennaio 1974.

Nel 2000 ha conseguito la Laurea in Fisica presso l'Università degli studi dell'Aquila discutendo una tesi sugli effetti del land-use sul clima a scala regionale.

Nel 2004 ha conseguito il Dottorato in Fisica presso il Dipartimento di Fisica dell'Università degli Studi dell'Aquila con una tesi sull'influenza delle polveri del deserto sulla precipitazione nell'area del Mediterraneo.

Nel 2003 è stata Short term visitor presso l'NCAR (National Center for Atmospheric Research) a Boulder, Colorado (NCAR).

Dal 2011 ricopre il ruolo di Tecnico Laureato presso il CETEMPS dell'Università dell'Aquila

E' coautrice di circa 25 pubblicazioni su riviste scientifiche internazionali, principalmente nel campo della Fisica dell'Atmosfera e dell'Idrologia. I suoi principali campi di interesse riguardano lo sviluppo di modelli numerici per sistemi complessi.