



Ricerca di Sistema elettrico

Analisi di risk forecast/assessment mediante modellistica meteorologica ed idrologica

M. Verdecchia e B. Tomassetti

Analisi di risk forecast/assessment mediante modellistica meteorologica ed idrologica

M. Verdecchia e B. Tomassetti (DSFC, Università degli Studi dell'Aquila)

Settembre 2016

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2015

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

Progetto: Sviluppo di un modello integrato di Smart District Urbano

Obiettivo: Piattaforma per la sicurezza delle infrastrutture critiche del distretto

Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione: "Analisi di risk forecast/assessment mediante modellistica meteorologica ed idrologica"

Responsabile scientifico ENEA: Maurizio Pollino

Responsabile scientifico Università degli Studi dell'Aquila: Marco Verdecchia

Indice

Sommario	4
1 Introduzione	5
2 Descrizione delle attività svolte e risultati	6
2.1 Implementazione del modello CHyM sul bacino di interesse	6
2.2 Allarme meteorologico e previsione idrologica	9
2.3 Definizione e visualizzazione degli indici di allarme idrologico	16
3 Conclusioni	20
4 Riferimenti bibliografici	21
5 Abbreviazioni ed acronimi	21
Curriculum scientifico del gruppo di lavoro.	22

Sommario

Il presente Report descrive le attività svolte dal Dipartimento di Scienze Fisiche e Chimiche (DSFC) dell'Università dell'Aquila nell'ambito dell'Accordo di collaborazione con l'ENEA, per una attività di ricerca dal titolo: "Analisi di risk forecast/assessment mediante modellistica meteorologica ed idrologica". L'obiettivo principale della collaborazione consiste nello sviluppare una piattaforma operativa che consenta di fornire previsioni affidabili 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 dalle 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 in prospettiva consiste nel rendere le suddette previsioni immediatamente fruibili dalle autorità o dagli enti che sono interessanti. Per superare queste difficoltà, in questa fase di sviluppo 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.

1 Introduzione

L'Accordo di collaborazione ha come finalità lo sviluppo di una piattaforma finalizzata a prevedere situazioni di allarme meteorologico e/o idrologico sul bacino del Tevere, all'interno del quale ricade l'area di studio delle attività previste nell'ambito dell'Obiettivo C ("Piattaforma per la sicurezza delle infrastrutture critiche del distretto", rif. Report RdS/PAR2015/016) del Progetto D.7 ("Sviluppo di un modello integrato di Smart District Urbano").

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 prevede l'utilizzo di un modello idrologico sviluppato presso il CETEMPS¹ dell'Università dell'Aquila e lungamente testato con simulazioni a diverse scale sia spaziali che temporali.

Il modello CHyM² 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; maggiori dettagli vengono discussi nella seguente sezione 2.1. 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.

Un'altra caratteristica del modello, che utile ricordare qui, è la possibilità di prevedere dettagliatamente 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 a cui si faceva riferimento poc'anzi.

Nelle tre sezioni seguenti diamo una descrizione dettagliata delle tre fasi principali della collaborazione, così come previsti dall'accordo: nella prima sezione viene descritta la implementazione del modello sul bacino di interesse; nelle due sezioni successive riportiamo i dettagli sulla ricostruzione dei campi di precipitazione, sulla predizione operativa della portata su tutta la rete idrografica simulata e sulla definizione degli indici di allarme. Nelle varie sezioni verranno descritte anche la modalità di fruizione dei risultati delle simulazioni; a tale scopo è stata sviluppata una apposita interfaccia web, automaticamente aggiornata ogni giorno.

¹ <http://cetemps.aquila.infn.it/>

² <http://cetemps.aquila.infn.it/chym/>

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Implementazione del modello CHyM sul bacino di interesse

Il modello CHyM è stato implementato in modalità operativa sul bacino di interesse, la zona geografica selezionata include oltre al bacino del Tevere tutto il Lazio. Tutti i campi di interesse sono definiti su una griglia regolare di 581x472 (longitudine x latitudine) punti. La risoluzione spaziale del dominio operativo di CHyM (circa 585 metri) è stata scelta in relazione alle dimensioni massime del canale per il fiume che si vuole simulare; in pratica per ogni punti di griglia il fiume deve essere completamente contenuto in esso.

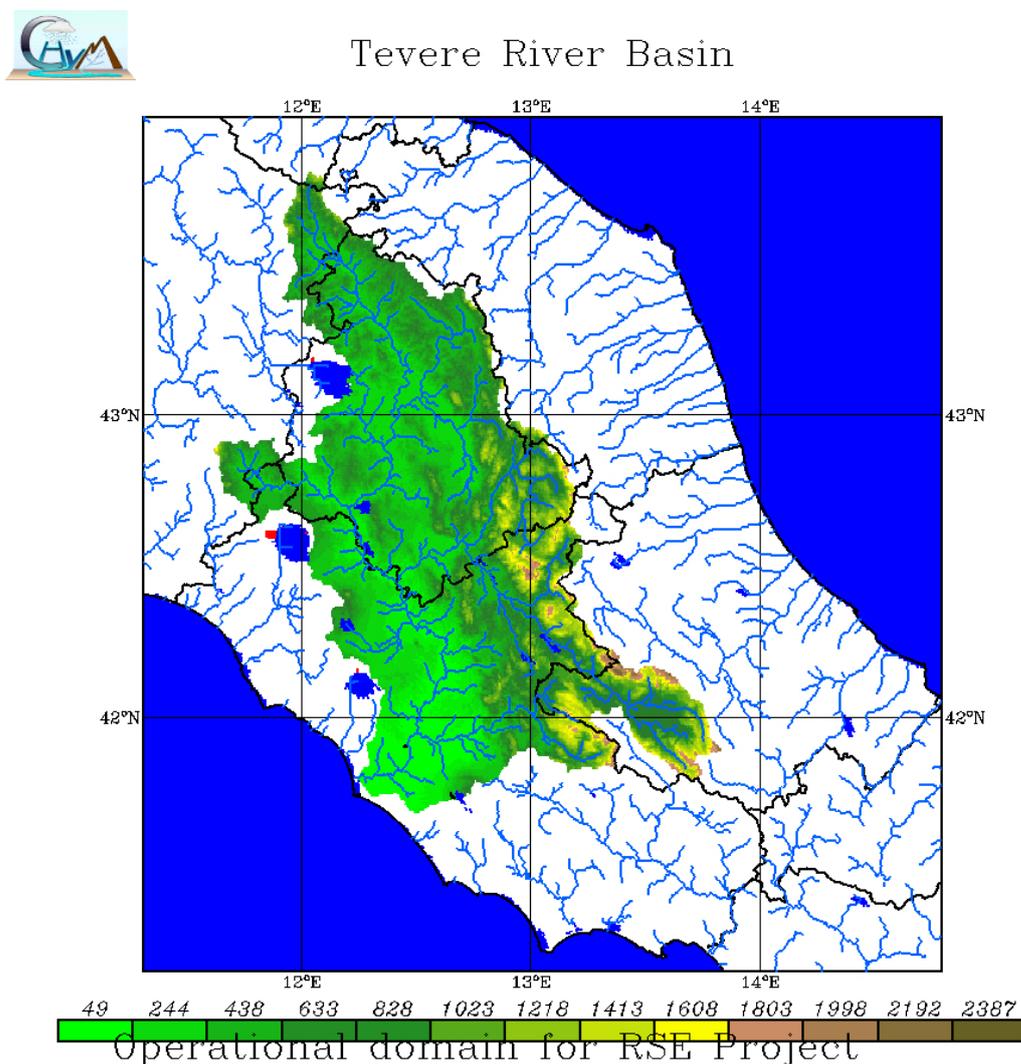


Figura 1. Rappresentazione grafica del bacino del Tevere come ricostruito sulla griglia numerica del modello CHyM. La parte colorata rappresenta l'area che, secondo lo schema di scorrimento calcolato, drena verso la foce del fiume.

Al fine di ricostruire sulla griglia lo schema di scorrimento, il primo passo consiste nell'assegnare ad ogni punto di griglia il valore della quota; a questa matrice si da solitamente il nome di DEM (Digital Elevation Model); la matrice del DEM viene costruita utilizzando i dati globali, che coprono cioè tutto il pianeta, forniti dalla NASA, in particolare si tratta dei dati ottenuti dalla missione

spaziale denominata Shuttle Radar Topography Mission³ (SRTM) che fornisce l'altitudine su tutto il globo con una risoluzione spaziale di 90 metri

Il passo successivo consiste nella definizione della matrice di scorrimento; in accordo con il principio di minimo di energia potenziale, definiamo, per ogni cella elementare la direzione come quella per cui è massima la pendenza; in altre parole, per ogni punto di griglia, si “sceglie” quella, tra le o celle adiacenti, in cui il valore del DEM è più basso. Purtroppo questo elementare approccio fallisce a causa della risoluzione finita, sia orizzontale che verticale del modello digitale del territorio; da un punto di vista numerico si generano delle singolarità di due tipi che vengono chiamate rispettivamente “*pit*” e “*flat area*”. I *pit* sono punti singolari in cui la cella ha un valore dell'altitudine più basso di tutte quelle adiacenti, mentre le aree piatte sono delle sequenze di celle che hanno lo stesso valore di quota; per entrambe queste situazioni non è possibile quindi determinare la direzione di scorrimento superficiale. Per risolvere queste singolarità CHyM implementa una serie di complessi algoritmi numerici che rendono possibile determinare in maniera coerente le direzioni di scorrimento per ogni cella e quindi ricostruire la rete drenante in un arbitrario dominio geografico di tutto il mondo. La descrizione dell'algoritmica e della sua implementazione è troppo ponderosa da darsi qui e ci limitiamo a descriverne i passi essenziali rimandando alla pubblicazioni di Coppola et al. (2007) per maggiori dettagli.

Come accennato, le singolarità si generano a causa della risoluzione finita del DEM, per poterle risolvere occorre effettuare uno “smoothing” della matrice del DEM in maniera da eliminare le zone piatte o i *pit*; allo stesso tempo lo smoothing non deve essere troppo “spinto” da rendere irrealistico il DEM stesso e quindi la rete drenante che ricostruisce. Per compiere questa operazione si effettuano una serie di manipolazioni numeriche complesse che si basano sulla teoria degli Automi Cellulari (CA). Secondo la definizione di Packard e Wolfram (1985), gli Automi Cellulari sono una semplice idealizzazione matematica dei sistemi naturali e sono “ispirati” alla osservazione del “comportamento collettivo” che taluni sistemi biologici, costituiti da molte singole parti elementari, mostrano.

L'applicazione dei concetti della Teoria sugli Automi Cellulari sulla matrice del DEM nel modello CHyM, può essere molto sinteticamente riassunta come segue:

- La matrice del DEM viene supposta essere un aggregato bidimensionale (latitudine-longitudine) di Automi Cellulari
- Ogni Automa, ovvero ogni cella elementare del dominio, modifica il suo stato (elevazione sul mare) a partire dalla media pesata dello stato delle celle adiacenti
- L'evoluzione del sistema cellulare bidimensionale viene iterato fino alla risoluzione di tutte le singolarità numeriche e la direzione di scorrimento superficiale viene coerentemente stabilita per ogni cella del dominio simulato
- Il sistema ripristina quindi la matrice originale del DEM e corregge le sole celle che si troverebbero a drenare verso una cella di elevazione maggiore

Rimandiamo all'articolo di Coppola et al. (2007) per una descrizione più dettagliata. Test effettuati su numerosi bacini anche complessi mostrano che l'algoritmo cellulare è molto efficace nell'eliminare singolarità anche molto complesse e che, dopo la risoluzione delle singolarità, la matrice del DEM risulta solo leggermente modificata rispetto alla matrice reale definita a partire dalle osservazioni SRTM.

³ <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>

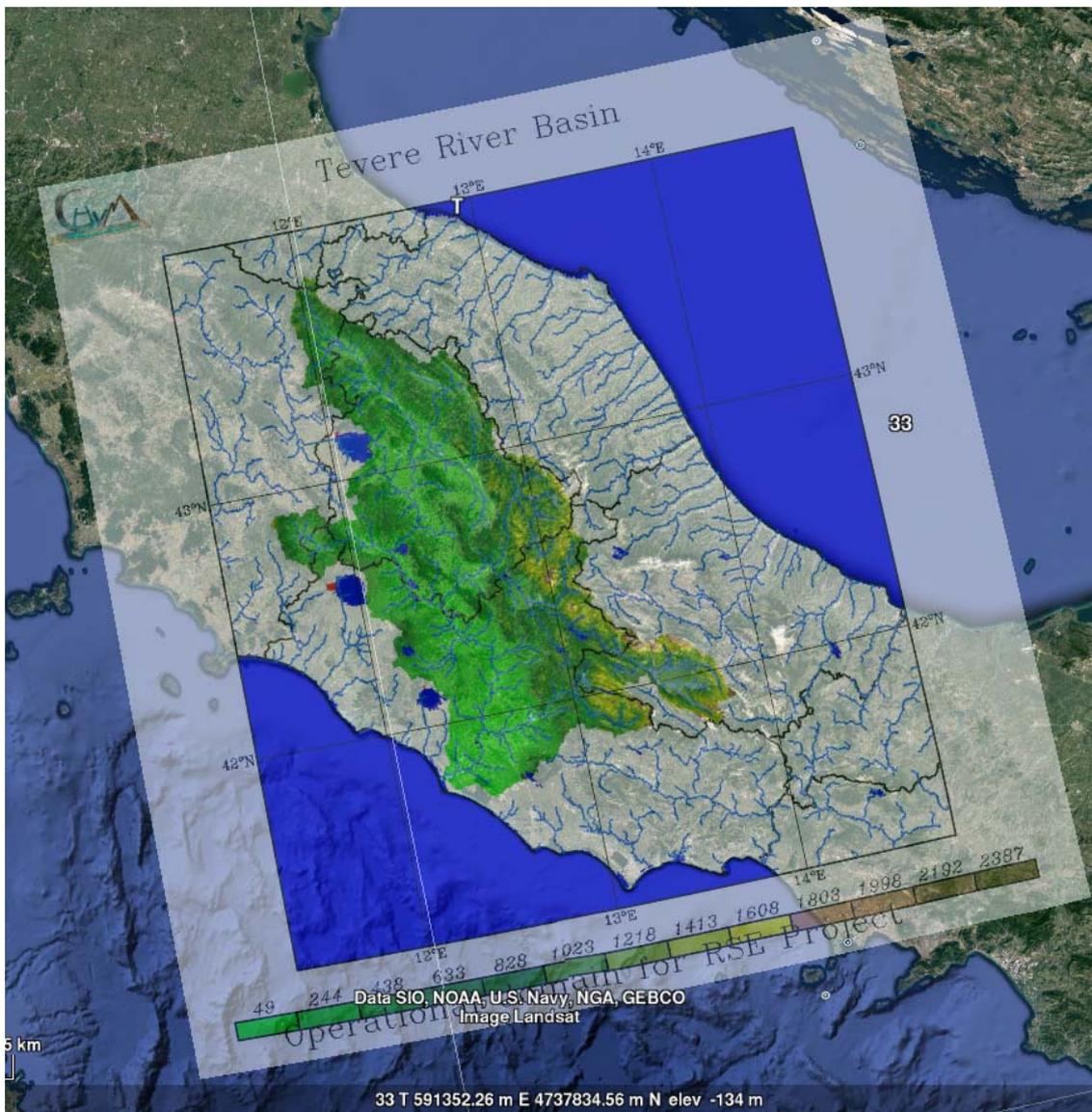


Figura 2. Come in Figura 1, ma stavolta la mappa del modello viene sovrapposta alla visualizzazione della piattaforma Google-earth. Per i futuri sviluppi ed utilizzi del modello operativo questa possibilità costituisce un potente strumento per sovrapporre le previsioni idrologiche alle features della piattaforma Google.

Il risultato della complessa manipolazione è mostrato nella Figura 1, dove viene mostrato il bacino del Tevere come ricostruito numericamente dal modello. La figura rappresenta una validazione del processo di ricostruzione numerica del bacino. Nel grafico viene evidenziata la parte del dominio geografico che viene drenata dal bacino del Tevere; la costruzione numerica di questa rappresentazione avviene attraverso due fasi successive e quindi due distinte implementazioni algoritmiche.

Nella prima fase vengono individuate le foci di tutti i fiumi ed i torrenti che sono presenti nel dominio, questo avviene attraverso la costruzione della cosiddetta matrice di accumulazione; l'algoritmo chiamato RSA (*Rolling Stones Algorithm*) è implementato in maniera da far "rotolare" idealmente una pallina, attraverso la matrice del DEM e sfruttando le direzioni di scorrimento che si sono calcolate in precedenza; ogni volta che una pallina transita per una cella viene

incrementato un contatore per la quella cella. Alla fine del processo, ovvero quando tutte le palline sono state drenate verso il mare o verso il bordo del dominio, la matrice di accumulazione che è stata costruita conterrà il numero di celle drenate da ogni singolo punto di griglia. Vedremo che questo algoritmo è molto importante per la determinazione delle soglie di allarme basate sia sulle precipitazioni che sulla portata predetta, qui descriviamo che la matrice di accumulazione consente di determinare i punti di griglia che corrispondono alle foci di fiumi e torrenti; queste celle vengono selezionate come quelle che hanno due caratteristiche:

- drenano verso una cella di mare;
- drenano un numero di celle superiore ad un certo threshold; se per semplicità assumiamo ogni cella di 1 km², possiamo assumere questo threshold dell'ordine di qualche centinaio di celle

Una volta selezionate le foci, la rete drenante del singolo bacino può essere ricostruito andando a ritroso e “disegnando”, intendiamo nel senso numerico ovviamente, il reticolo idrografico che vediamo riportato nella Figura 1; si possono quindi selezionare l'insieme delle celle che drenano verso la foce presa come punto di partenza e questo sottoinsieme della matrice è quello che è evidenziato nella Figura 1.

La Figura 1 è già un buon test su come l'algoritmo ricostruisca in maniera ragionevole, con i limiti dovuti alla risoluzione finita del DEM, il bacino idrografico e la sua rete di drenaggio.

Un ulteriore test può essere effettuato visualizzando la Figura, e quindi la matrice discreta utilizzata dal modello, sulla piattaforma Google-Earth come mostrato in Figura 2; qui si evince più chiaramente come il modello riproduca correttamente la rete drenante ed il bacino interessato, si nota infatti come i limiti del bacino coincidano per lunghi tratti, sia pure con l'incertezza legata alla risoluzione orizzontale del modello, con i confini regionali, così come è nella realtà. La Figura 2 rappresenta inoltre un esempio di come, negli sviluppi futuri del progetto, si potrà realizzare una visualizzazione “user-friendly” e molto efficace delle mappe prodotte dal modello; in particolare la visualizzazione delle mappe di allarme, di cui si parlerà nei prossimi paragrafi, renderebbe estremamente agevole individuare i punti critici che si trovano a rischio nel bacino selezionato.

2.2 Allarme meteorologico e previsione idrologica

In questa sezione analizzeremo le procedure per la ricostruzione e la visualizzazione dei campi di precipitazione; daremo inoltre definizione e giustificazione di un indice di allarme idrologico che si basa sulla quantità di precipitazione drenata dal reticolo idrografico.

Uno dei risultati attesi nell'Obiettivo C (rif. Report RdS/PAR2015/016) del Progetto D.7 consiste nella produzione di mappe di precipitazione previste ed osservate ai fini dell'analisi operativa dei rischi, con particolare riguardo alle infrastrutture citriche localizzate nel Distretto di interesse. A tal fine si sfrutta una delle features più peculiari del modello CHyM, ovvero la possibilità di acquisire dati eterogenei di precipitazione e di aggregarli producendo delle mappe che rappresentano, ora per ora, la “migliore” stima della pioggia nell'intervallo considerato.

Per le simulazioni idrologiche in situazioni operative, una delle difficoltà più critiche consiste nell'avere una rappresentazione il più possibile affidabile del campo di precipitazione. Ovviamente la migliore sorgente di dati consiste nelle osservazioni a terra; la rete pluviometrica, tuttavia, “soffre” di una distribuzione che non è ottimale, le osservazioni sono disponibili limitatamente ad alcuni punti quasi sempre localizzati vicino ad i centri abitati e sono, ad esempio, molto scarse o

semplicemente assenti in zone montuose o impervie; considerando la forte variabilità spaziale e temporale delle precipitazioni, questa limitazione introduce una forte incertezza nella ricostruzione del campo, qualunque sia l'algoritmo utilizzato. A tutto questo va aggiunto la difficoltà legate al fatto che non tutte le osservazioni sono disponibili sempre e con la stessa risoluzione temporale.

Per cercare di superare queste difficoltà, CHyM implementa una serie di algoritmi che consentono di integrare le misure pluviometriche con altre stime disponibili. Prima di dare qualche dettaglio sull'algoritmica implementata, diamo una breve descrizione delle sorgenti di dati utilizzate:

- **Osservazioni pluviometriche.** Sono i dati più affidabili per definire lo scenario delle precipitazioni pregresse, la rete pluviometrica tuttavia tende a coprire solo una parte del territorio ed in maniera affatto irregolare; per ovvie ragioni, anche di carattere logistico, i pluviometri sono infatti collocati prevalentemente presso i centri abitati e quasi sempre lungo le vallate; il campo di precipitazione diventa quindi difficile da stimare utilizzando solo questi dati, specialmente in una zona ad orografia molto complessa come quella dell'Italia centrale
- **Stime Radar.** Possono essere utilizzate per integrare i dati disponibili dalla rete di osservazione pluviometrica, ovvero questi ultimi possono essere utilizzati per calibrare il campo di riflettività registrato dal radar ed ottenere stime affidabili ad alta densità spaziali. Il Dipartimento di Scienze Fisiche e Chimiche (DSFC) dell'Università dell'Aquila, grazie alla consolidata sinergia con il Centro di Eccellenza CETEMPS, dispone in tempo reale delle stime di precipitazioni ottenute dalle osservazioni effettuate con il radar posizionato a Monte Midia⁴ (AQ) che copre gran parte dell'Italia Centrale;
- **Stime da satellite.** Le stime di precipitazione ottenute dai dati da satellite sono in genere meno accurate di quelle ottenute dai sistemi radar, tuttavia l'osservazione da satellite consente di coprire quelle zone che sono invisibili dalla posizione del radar. In situazioni operative, inoltre le stime satellitare rappresentano una necessaria ridondanza osservativa da sfruttare quando le osservazioni o le elaborazioni dei segnali radar si rendessero temporaneamente indisponibili. Il DSFC, in collaborazione con il CETEMPS, ha sviluppato un sistema denominato MICRA (Marzano et al., 2004) che consente di ottenere stime di precipitazione dalla integrazione di dati da satellite ed osservazioni a terra.
- **Previsioni meteorologiche.** Il DSFC, grazie alla collaborazione con il CETEMPS, dispone in modalità operativa di due diverse previsioni meteorologiche che sono "specializzate" per l'Italia Centrale a partire dalle previsioni globali acquisite dal centro europeo ECMWF⁵ (European Center Medium Weather Forecast), e che sono prodotte più volte al giorno con una risoluzione orizzontale di qualche chilometro, mentre i risultati sono resi disponibili con una risoluzione temporale di un'ora. I modelli utilizzati sono MM5⁶, sviluppato in collaborazione tra la Pennsylvania State University ed il National Center for Atmospheric Research del Colorado, ed il modello WRF⁷, sviluppato da più enti, ma in particolare dal National Center for Atmospheric Research del Colorado e dalla National Centers for Environmental Prediction (NCEP).

⁴ <http://meteorema.aquila.infn.it/cgi-bin/radarweb/midia.pl>

⁵ <http://www.ecmwf.int/>

⁶ <http://www.ecmwf.int/en/elibrary/11845-modelling-winter-clouds-mm5-model>

⁷ <http://www.wrf-model.org/index.php>

Per ogni step orario di integrazione, il modello CHyM utilizza simultaneamente ognuna di queste sorgenti di dati per la “migliore” ricostruzione possibile del campo di precipitazione. Rimandando, nuovamente, alla pubblicazione di Coppola et al. per maggiori dettagli, mentre qui diamo una sommaria descrizione dell'algoritmica implementata.

Ad ogni step orario, il dominio simulato viene suddiviso in sotto-domini di forma arbitraria, per ognuno di questi la precipitazione viene ricostruita con la sorgente più affidabile possibile, nell'ordine: rete di pluviometri, stime da radar meteorologico, stime da satellite e modelli meteorologici; ovviamente nelle simulazioni operative le soli previsioni meteo sono utilizzate per gli step di tempo “futuri”, intendiamo qui per futuri quelli oltre il momento in cui la simulazione viene effettuata.

September 15, 2016 h: 16

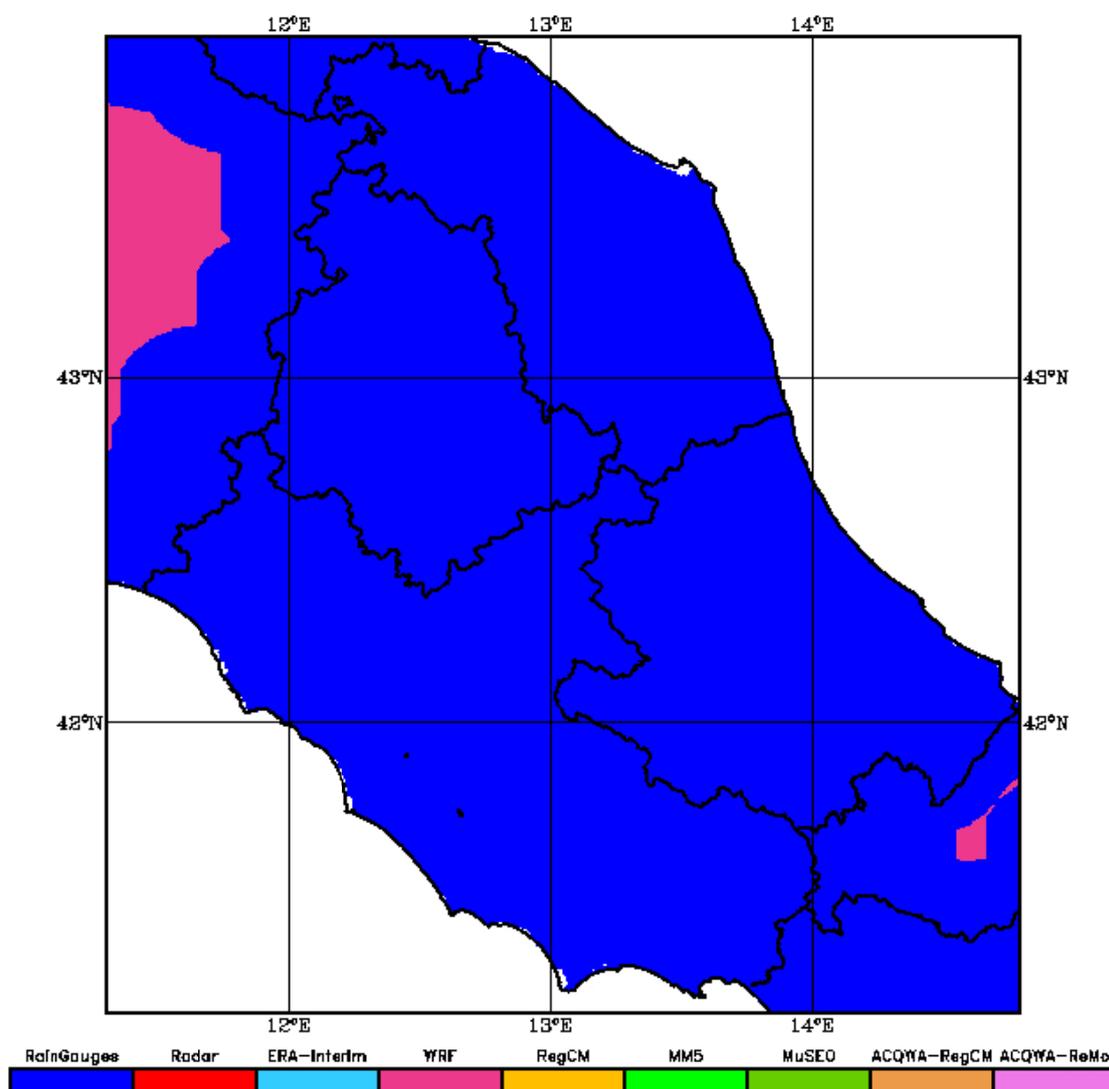


Figura 3. Rappresentazione grafica delle sorgenti di dati utilizzate per ricostruire una singola mappa di precipitazione oraria. In blu le zone dove sono stati utilizzati i pluviometri, in rosa le zone dove sono state utilizzate le previsioni meteorologiche.

Un sotto-dominio geografico è un insieme di celle che distano meno di un certo threshold da un punto dove è disponibile una osservazione (o una stima radar/satellite o un punto di griglia del modello meteorologico) della precipitazione, il valore del threshold dipende dalla risoluzione della griglia ed è tipicamente di qualche chilometro. Il valore della precipitazione in ognuno dei punti di griglia del sottodominio viene inizialmente settato come media pesata dei punti di misura disponibili nell'intorno, il peso viene determinato come l'inverso del quadrato della distanza.

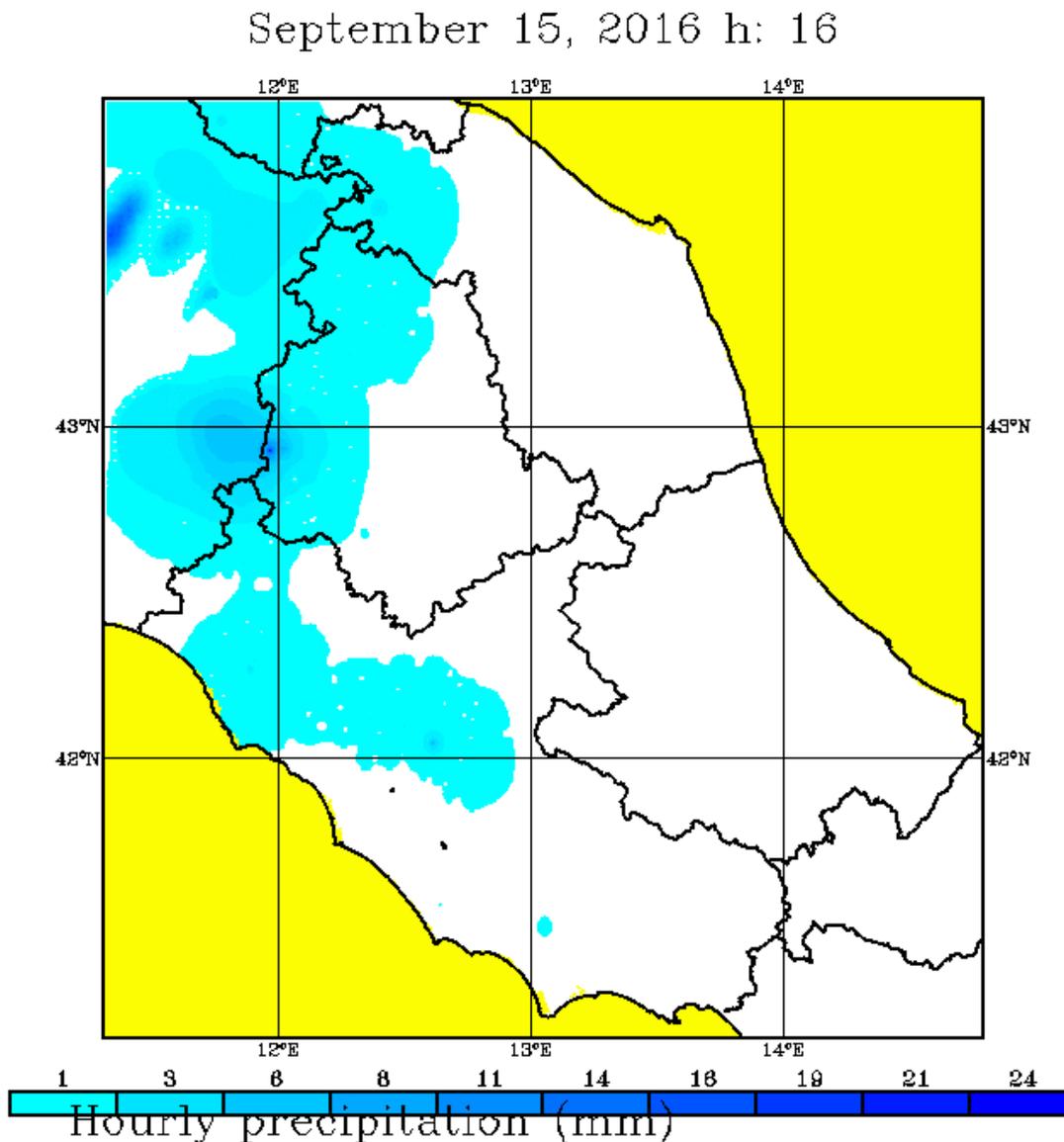


Figura 4. Il campo di precipitazione come ricostruito, sulla griglia di CHyM, a partire da differenti data sets mostrati nella Figura 3.

Una volta ricostruito il campo nel sottodominio parziale, i valori stimati vengono “smoothati”, con la tecnica basata sugli automi cellulari che abbiamo sommariamente descritto nel paragrafo precedente. Ad ogni ciclo di evoluzione degli automi il valore della precipitazione in un certo punto viene “corretto” tenendo conto dei valori delle 8 celle dell'intorno. Concettualmente l'applicazione dell'algorithmo può sintetizzato come segue: a scala idrologica (le celle distano poche centinaia di

metri) possiamo considerare ragionevole l'approssimazione per cui la precipitazione in un punto è data dalla medie delle precipitazioni negli 8 punti adiacenti; l'algoritmo cellulare non fa altro che cercare una soluzione di questo tipo che sia consistente con le misure effettivamente disponibili.

I risultati sulle mappe di precipitazione ed altri prodotti, aggiornati quotidianamente, sono già resi disponibili, in modalità di consultazione e visualizzazione, su una pagina web appositamente dedicata e raggiungibile all'indirizzo:

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

in cui i campi di precipitazione sono visualizzati a step orario. Allo stesso tempo, i dati originali in forma binaria in formato NetCDF⁸, sono resi disponibili per il download e l'utilizzo nel DSS, e per la conseguente la visualizzazione nell'interfaccia WebGIS del DSS.

Tra i prodotti resi disponibili alla URL indicata, c'è la mappa, per ognuna delle ore di integrazione, delle sorgenti di dati utilizzate per la ricostruzione del campo di pioggia. Un esempio è riportato nella Figura 3. Sottolineiamo che i falsi colori in questa figura non hanno nulla a che vedere con la precipitazione, ma danno solo una idea di come il dominio geografico sia stato suddiviso in due zone; in quella blu la densità di pluviometri è sufficiente a ricostruire la precipitazione mentre nelle zone in viola si sono utilizzati i dati del modello meteorologico. La situazione ovviamente può essere diversa nell'ora successiva e nell'ora precedente. Un esempio di come il campo viene ricostruito è invece mostrato nella Figura 4, qui i toni di blu indicano i valori della precipitazione.

Vediamo ora come proponiamo di ricavare un indice di allarme a partire dai campi di precipitazione che abbiamo ricostruito, per semplicità di esposizione parleremo di "precipitazione", ma intendiamo, fino alla fine del presente paragrafo, la "precipitazione effettivamente disponibile per il "runoff" ovvero la pioggia che cade al suolo meno quella che viene trattenuta dalla vegetazione o che si infiltra nel terreno, questo campo di runoff viene calcolato dal modello durante l'integrazione.

L'indice proposto lo chiamiamo CAI (*CHyM Alarm Index*) ed è calcolato come segue:

$$CAI(t) = \frac{\int \int P(t, s) dt ds}{\int ds}$$

Si tratta del rapporto tra il totale della precipitazione drenata e l'area a monte drenata da ogni cella elementare del dominio. L'integrazione è effettuata, per ogni punto di griglia su tutto il bacino a monte drenato, mentre l'intervallo temporale di integrazione corrisponde al tempo medio di corruzione (solitamente si parla di *runoff time*) della cella selezionata. Notiamo intanto che l'indice proposto ha una semplice interpretazione fisica, rappresenta infatti il rapporto tra il volume d'acqua precipitata e la superficie drenata; il CAI corrisponde quindi alla precipitazione media drenata da una singola cella. L'intervallo temporale di integrazione, come detto, è

⁸ NetCDF (Network Common Data Form) è un set di librerie software e di dati autodescrittivi "platform independent" (indipendenti dal Sistema Operativo) atti alla creazione, accesso, modifica e condivisione di dati "array oriented" ("dati grigliati"), sviluppato e mantenuto dal programma UNIDATA presso l'UCAR (University Corporation for Atmospheric Research, <http://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/>). All'atto pratico, si definisce "NetCDF" un tipo di formato dati usato soprattutto in ambito scientifico, con particolare riferimento alle applicazioni inerenti il clima, la meteorologia e l'oceanografia, e nelle applicazioni di tipo GIS. L'uso di standard e convenzioni ufficiali, rende possibile integrare velocemente i dati in formato NetCDF in sistemi complessi come sistemi di catalogazione o sistemi GIS che offrono, ad esempio, la possibilità di analizzare e manipolare, i dati in remoto.

caratteristico del sotto bacino considerato (quindi è diverso per ogni cella del dominio) e rappresenta il tempo medio che una goccia di pioggia impiega per essere drenata fino al punto di griglia considerato.

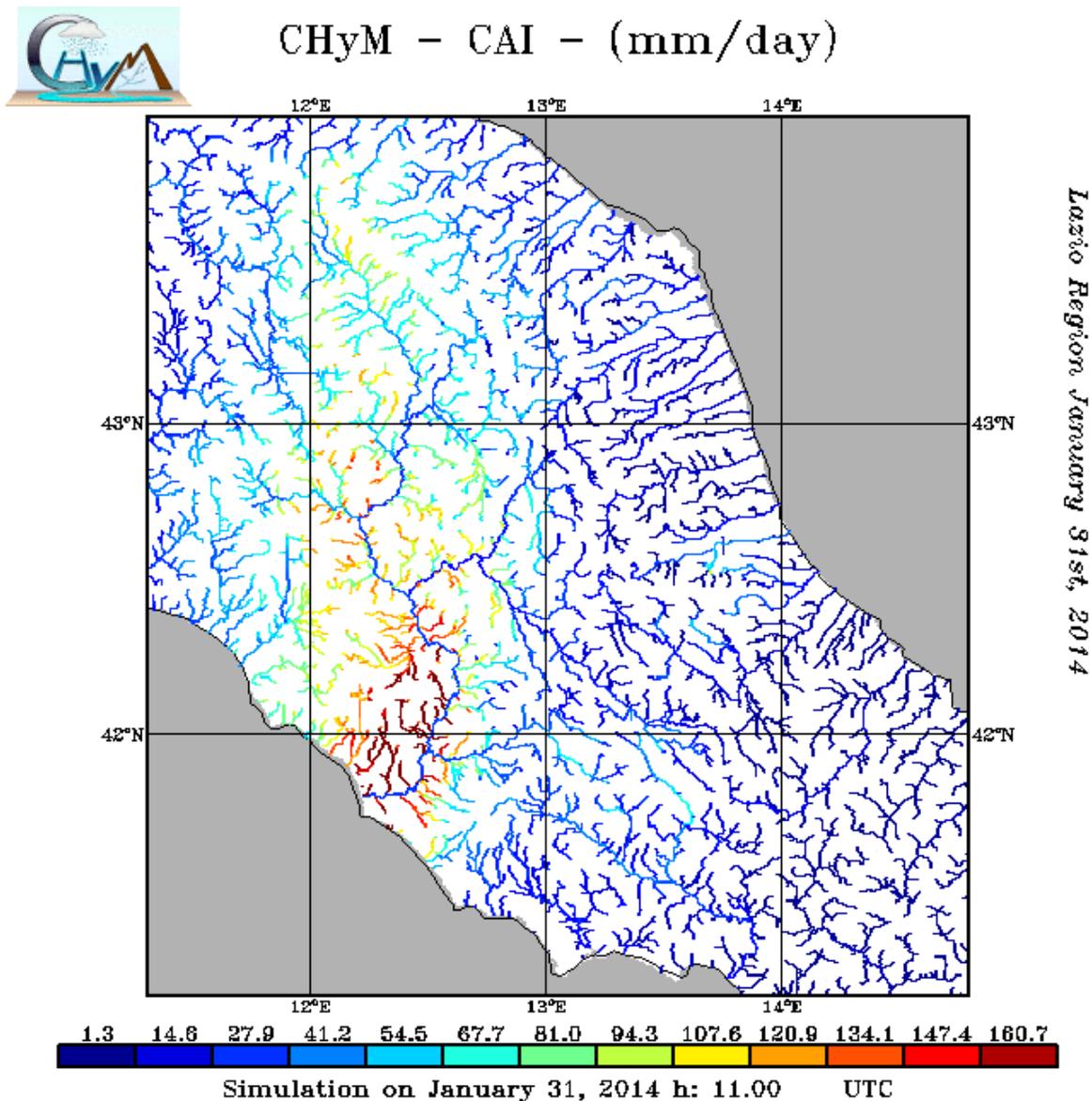


Figura 5. L'indice di allarme di CHyM rappresentato per il caso studio del 31 gennaio 2014, in cui si verificarono molte situazioni critiche tra il Lazio e la Toscana oltre che nella capitale.

Molti test effettuati su numerosi casi studio (si veda ad esempio Tomassetti et al., 2005) hanno mostrato come l'indice proposto è molto significativo ed efficace nell'evidenziare i segmenti della rete drenante che sono sottoposti a possibili stress. Un esempio del risultato di una intera simulazione di questo genere è riportato nella Figura 5; la figura ha l'aspetto di una rappresentazione della rete idrografica, in questa rappresentazione sono colorati in giallo e poi in rosso le zone in cui l'indice di allarme supera un certo threshold empiricamente determinato, in particolare la mappa rappresentata in Figura 5 si riferisce al caso studio del 31 gennaio 2014 in cui si verificarono numerose esondazioni tra il Lazio e la Toscana.

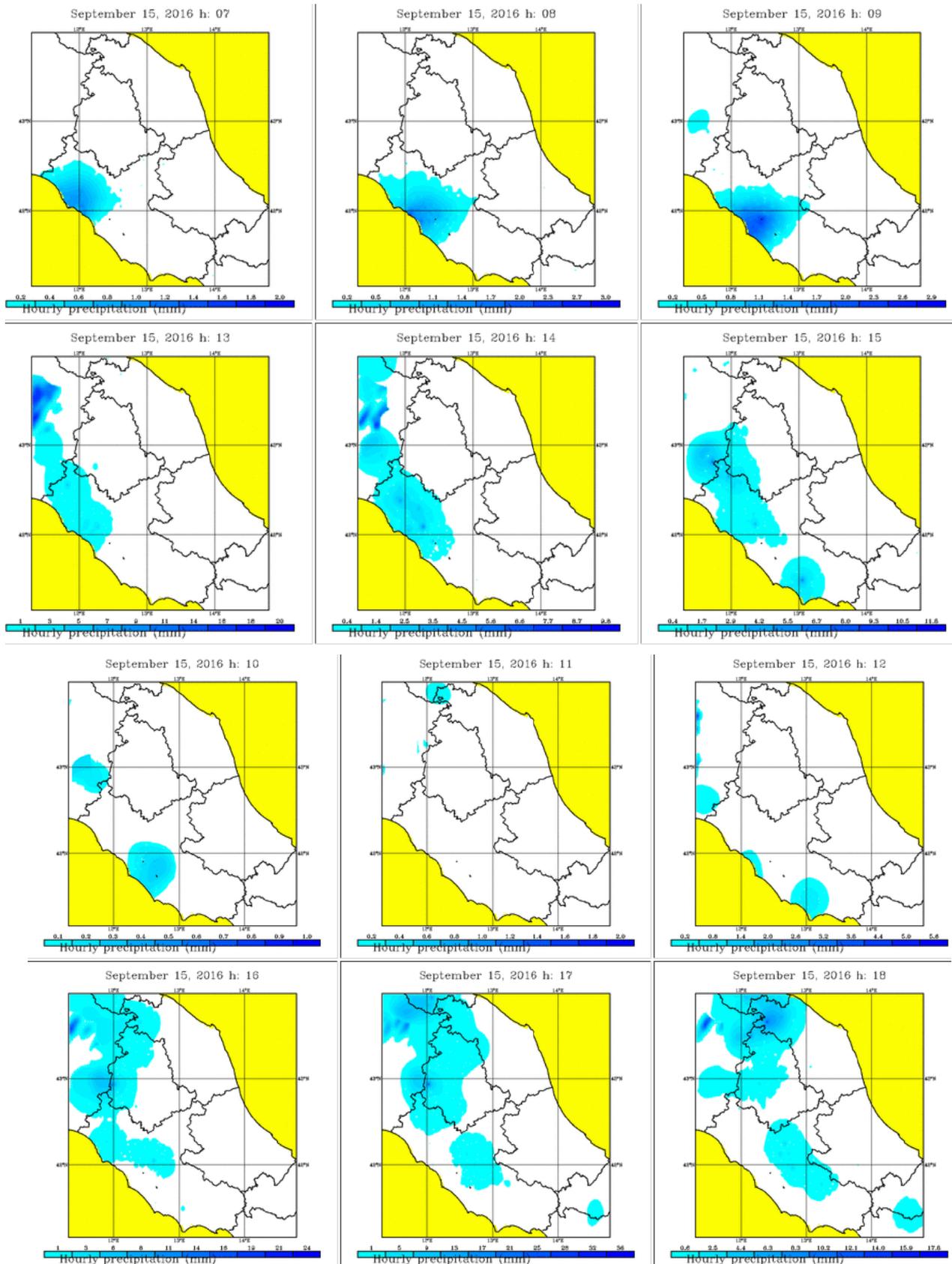


Figura 6. Un esempio della sequenza dei campi di precipitazione come ricostruite dal modello CHyM e rese disponibili operativamente su piattaforma web, sia in formato grafico che in formato numerico.

Se le previsioni del tempo fossero state sufficientemente accurate (ed in questo caso lo erano), questa mappa sarebbe stata disponibile circa 48 ore prima consentendo, alle autorità preposte ed a tutti gli operatori interessati di prendere adeguate misure di prevenzione.

Sottolineiamo ancora come questa visualizzazione, sovrapposta a quanto disponibile sulla piattaforma Google-Earth (si veda la Figura 2) consentirebbe, attraverso lo zoom e tutte le altre funzioni disponibili su Google-Earth, di individuare facilmente strutture e punti sensibili a rischio.

Nella Figura 6 riportiamo, a titolo di esempio, la visualizzazione di una sequenza di mappe di precipitazioni, così come visualizzabili a partire dalla pagina web che è stata costruita appositamente per questo progetto. I campi sono forniti a risoluzione oraria e forniti anche in termini numerici in formato NetCDF.

2.3 Definizione e visualizzazione degli indici di allarme idrologico

In questa sezione descriviamo in breve il funzionamento del modello CHyM ed indicheremo un nuovo indice di allarme idrologico, stavolta esplicitamente basato sulla misura della portata.

CHyM è un modello a parametri distribuiti in cui tutte le quantità fisiche ed idrologiche sono definite su una griglia regolare equi-spaziata. I dettagli sulla griglia utilizzata per l'applicazione che riguarda questo progetto sono dati nel paragrafo 2.1.

Lo scorrimento superficiale viene simulato risolvendo esplicitamente l'equazione di continuità e l'equazione del momento. In condizioni stazionarie, l'equazione del momento si riduce ad essere una relazione diagnostica tra la sezione bagnata del fiume e la portata; la costante di proporzionalità ha le dimensioni di una velocità e dipende esplicitamente dalla pendenza, dal raggio idraulico a sua volta funzione dell'area drenata e dal coefficiente di scabrezza; quest'ultimo viene assegnato per ogni cella a seconda della tipologia di suolo secondo quanto è stato dedotto dalla letteratura scientifica sull'argomento. L'equazione di continuità è, invece, un'equazione prognostica in cui compare la derivata spaziale della portata e la derivata temporale della sezione bagnata; questa equazione viene quindi esplicitamente integrata per la predizione della portata.

Il modello calcola esplicitamente il contributo allo scorrimento superficiale dovuto allo scioglimento delle nevi, alle latitudini che qui interessano, esistono solo poche zone coperte da ghiacciai, nella zona del Gran Sasso. Per il resto la eventuale copertura nevosa viene dedotta dai dati satellitari MODIS⁹ che ci vengono forniti in tempo quasi reale dall'ente spaziale statunitense. Nel caso delle simulazione operative la copertura nevosa viene assunta costante per i futuri tempi di integrazione, a partire dall'ultima immagine MODIS disponibile. Il *melting* è parametrizzato come somma di due contributi uno che dipende dalla temperatura ed uno che dipende dalla radiazione solare disponibile; quest'ultima viene calcolata in funzione della latitudine, dell'ora del giorno e del ciclo annuale.

⁹ MODIS (or Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer): <https://modis.gsfc.nasa.gov/>. MODIS è presente come payload a bordo dei satelliti Terra (EOS AM) ed Aqua (EOS PM) della NASA, lanciati rispettivamente nel 1999 e nel 2002 e progettati per l'osservazione della Terra. Gli strumenti raccolgono dati in 36 bande spettrali, compresi tra 0,4 μm e 14,4 μm di lunghezza d'onda, e con ampia risoluzione spaziale (due bande a 250 m, cinque a 500 m e ventinove bande alla risoluzione di 1 km). Insieme, i due strumenti mappano l'intero pianeta in uno o due giorni e sono stati progettati per raccogliere informazioni sulle dinamiche globali di larga scala, tra le quali: i cambiamenti nella copertura nuvolosa della Terra, il bilancio dell'energia radiante ricevuta ed emessa dal nostro pianeta, i processi che hanno luogo negli oceani, sui continenti e nella bassa atmosfera.

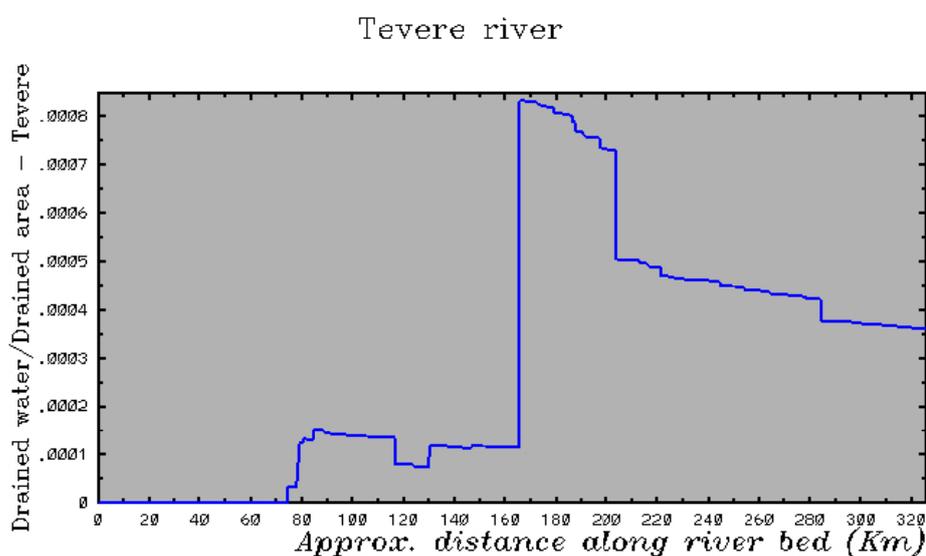
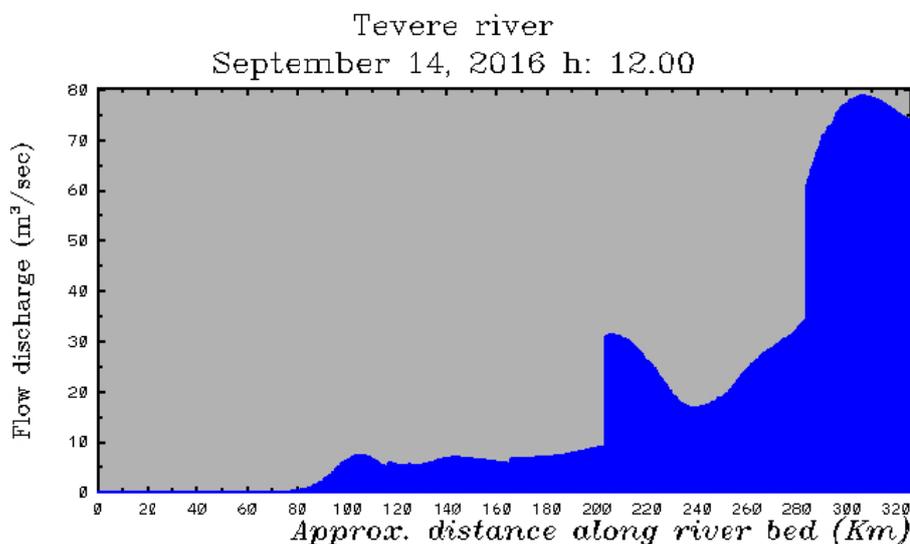


Figura 7. Un esempio di visualizzazione grafica della portata prevista del fiume Tevere lungo l'asta principale.

CHyM parametrizza esplicitamente anche i contributi al ciclo idrologico che sono dovuti alla evapotraspirazione, alla infiltrazione del terreno in base alla umidità relativa del suolo stesso ed al cosiddetto *return flow* che tiene conto del deflusso profondo delle acque. Per quest'ultimo termine è stato implementato un approccio piuttosto sofisticato, rispetto ad altri modelli analoghi; il contributo del deflusso di falda viene calcolato in funzione del totale dell'acqua che viene infiltrata a monte del punto considerato, si considera un tempo caratteristico di alcuni mesi, tempo che appare ragionevole per bacini medio-piccoli come quelli del Centro Italia. Per maggiori

dettagli sulla parametrizzazione adottata per i vari contributi al ciclo idrologico si veda, ad esempio, Coppola et al., 2014.

Le diverse parametrizzazioni hanno come obiettivo quello di prevedere esplicitamente la portata per ogni punto-griglia del bacino simulato. Se isoliamo il percorso principale del fiume Tevere, ad esempio, siamo quindi in grado di visualizzare, per un dato istante dell'integrazione, la portata lungo il percorso principale del fiume. Un esempio è riportato nella Figura 7, dove sull'ascissa è riportata la distanza approssimativa dalla foce del fiume. Il risultato mostrato in figura (ed i dati forniti in termini numerici a partire dal sito web citato sopra) rappresentano quanto esplicitamente previsto nell'allegato tecnico dell'Accordo di Collaborazione "Analisi di risk forecast/assessment mediante modellistica meteorologica ed idrologica", stipulato tra Università dell'Aquila ed ENEA. In realtà, è stato ottenuto un risultato più ambizioso in quanto nell'accordo si parla esplicitamente solo di "alcuni punti rappresentativi" del bacino.

Come si vede quindi, l'attività operativa è in grado di mettere a disposizione i valori di portata previsti per i giorni di simulazione, per l'attuale *setting* del modello parliamo di una previsione di 48-72 ore rispetto al momento (tipicamente le prime ore del mattino di ogni giorno) in cui la simulazione viene effettuata.

L'esperienza, tuttavia, mostra che la portata non è quasi mai un dato sufficiente a stabilire delle eventuali situazione di pericolosità dal punto di vista di possibili fenomeni di esondazione o di livelli critici. Innanzitutto perché esistono poche serie storiche affidabili per la calibrazione dei modelli stessi; inoltre tali serie non sono quasi mai disponibili per i piccoli bacini dove, invece, fenomeni critici sono sempre più di frequente osservati. Facciamo, per esempio osservare, che la misura della portata è assai difficile in condizioni di piena, durante le quali il flusso dei fiumi è dominato da forti turbolenze e misure affidabili sono molto complicate da ottenere.

Non esiste, inoltre, neanche nella vasta letteratura scientifica accumulatasi negli anni, un criterio universalmente accettato per poter stabilire quale livello di portata sia critico per un certo bacino. Solitamente la Protezione Civile stabilisce delle soglie di allerta, ma queste sono assegnati solo a determinati punti ove esistono delle serie osservate o dove dei fenomeni di esondazione sono effettivamente stati registrati. Per superare queste difficoltà, il modello CHyM calcola un indice basato sulla portata che dipende dal punto del reticolo idrografico che si considera. Questo indice è stato chiamato BDD (*Best Discharge-based Drainage alarm index*) ed è definito come segue:

$$BDD_i(t_1 - t_2) = \frac{\max_{t_1 \rightarrow t_2}(Q_i(t))}{R_i}$$

Per un dato intervallo di tempo, che nella formula è indicato come t_2-t_1 , calcoliamo, per ogni punto di griglia il valore massimo della portata che ci si aspetta, a partire dalla simulazione effettuata. Questo valore viene diviso per il valore del raggio idraulico calcolato per la cella elementare considerata; quest'ultimo viene supposto essere, secondo quanto riportato nella letteratura, una funzione dell'area totale drenata dalla cella-canale. Notiamo anche qui che l'indice proposto ha una semplice interpretazione fisica, dimensionalmente è una velocità e rappresentata l'altezza della pioggia drenata per unità di tempo. In pratica, se su tutto il bacino a monte pioveressero in maniera uniforme 100 mm in 10 ore, quel punto del canale dovrebbe drenare 10 mm/h ovviamente riferiti a tutto il bacino a monte.

Diamo anche una giustificazione più concettuale: il numeratore rappresenta quanto la cella sta drenando in un dato istante, il denominatore rappresenta una stima della sezione del fiume. Molti test, hanno anche qui consentito di validare l'ipotesi della definizione dell'indice di allarme (il "Best" che compare nell'acronimo si riferisce proprio a tutte le differenti definizioni che sono state testate) ed i valori di tale indice che vanno considerati critici. Il risultato può essere visualizzato in una mappa di allarme simile a quella riportata per l'indice CAI (Figura 5). Inoltre possiamo fornire (in formato grafico e numerico) l'indice di allarme lungo l'asta del fiume ed un esempio è riportato nella Figura 8. Questa figura è ottenuta con gli stessi dati di portata della Figura 7, abbiamo scelto questo caso perché è molto significativo far notare che il picco della portata NON corrisponde al picco dell'indice di allarme, in quanto quest'ultimo tiene conto, punto per punto della stima delle dimensioni trasversali del fiume e quindi della sua effettiva capacità di "drenare" la portata prevista.

3 Conclusioni

La collaborazione ha consentito di sviluppare un sistema che, basandosi sull'acquisizione di dati eterogenei, consente di avere a disposizione un efficace strumento di allarme – integrabile nel DSS di progetto – per situazioni derivanti da eventi meteorologici severi e dal formarsi di portate critiche per la rete drenante del bacino del Tevere.

Gli aspetti più innovativi nella implementazione operativa del sistema di allarme sono essenzialmente due. Il primo riguarda la ricostruzione dettagliata dei campi di precipitazione a cadenza oraria, utilizzando fonti eterogenee di dati; questo permette di ottenere lo scenario più realistico possibile “coprendo” le varie zone geografiche con osservazioni e stime da rete pluviometrica, rilevamenti radar e da satellite. La suddivisione del dominio geografico non è fissa, ma dipende dalla effettiva disponibilità di dati, per ogni ora della simulazione.

Un altro aspetto peculiare e notevolmente innovativo riguarda la visualizzazione del risultato finale al fine di una immediata ed efficace fruizione dello stesso. Sia in forma grafica che numerica, il sistema fornisce una mappa della pericolosità attesa, localizzando i segmenti della rete drenante dove si stima che siano possibili situazioni rischio. Questo approccio rende immediata la percezione dell'evento e, in prospettiva degli sviluppi futuri, potrebbe essere utilizzato per consentire azioni preventive più efficaci.

Relativamente agli sviluppi futuri, che si intende affrontare nel prosieguo del progetto e della collaborazione con ENEA, vi è innanzitutto la possibilità di esportare e scalare l'approccio metodologico ad altri contesti territoriali applicativi. L'approccio adottato, infatti, è assolutamente generale ed i modelli che sono stati utilizzati sono facilmente estendibili ad altri bacini o zone geografiche, di tutto il territorio nazionale. Un altro sviluppo che potrà essere utile approfondire riguarderà la specializzazione delle previsioni di rischio ad obiettivi sensibili: in altre parole la situazione di allarme potrebbe essere data, non per un segmento della rete drenante, ma per particolari situazioni (e.g., località o impianti civili ed industriali) che risultano sensibili e/o strategici per i gestori di CI o per la Pubblica Amministrazione (in quanto istituzionalmente responsabili come decisori, pianificatori o autorità di Protezione Civile). Questo sviluppo può consentire di eliminare un passaggio che, come messo in evidenza in più punti di questo Report, risulta spesso molto critico e difficoltoso: si tratta della fase in cui responsabili della gestione (e della sicurezza) delle CI o quelli della gestione delle emergenze, si trovano a dover proiettare sulle loro strutture di competenza lo scenario meteorologico o idrologico previsto dai modelli. In altre parole, si tratterà di affrontare uno sviluppo applicativo molto impegnativo e complesso, che consenta di passare dalla previsione del rischio alla previsione degli effetti sulle strutture/infrastrutture o più in generale sulle attività umane presenti in una determinata area di interesse, quale può essere un distretto urbano.

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,, "", Sci. Total Environ, 493 (214), 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. N. H. Packard, S. Wolfram, "Two-dimensional cellular automata", 38, J. Statist. Phys., (1985), pp. 901-946.
5. Tomassetti B., E. Coppola, M. Verdecchia, and G. Visconti, "", Adv. Geosci., 2 (2005), pp. 59-63.

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

RSA - Rolling Stones Algorithm, algoritmo per la ricostruzione della rete drenante

SRTM - Shuttle Radar Topography Mission

WRF - Weather Research and Forecasting Model, modello meteorologico

Curriculum scientifico del gruppo di lavoro.

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 è 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 di Boulder (Colorado) e presso il Centro Europeo per la Ricerca Nucleare di Ginevra.

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 15 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.