



Ricerca di Sistema elettrico

Applicazione approccio numerico operativo per “early flash flood warning” a infrastrutture e siti sensibili in aree urbane

Marco Verdecchia e Barbara Tomassetti

APPLICAZIONE APPROCCIO NUMERICO OPERATIVO PER “EARLY FLASH FLOOD WARNING” A INFRASTRUTTURE E SITI SENSIBILI IN AREE URBANE

Marco Verdecchia (Dipartimento di Scienze Fisiche e Chimiche, Università dell'Aquila) Barbara Tomassetti (Cetemps, Centro di eccellenza, Università dell'Aquila)

Dicembre 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 – III annualità

Obiettivo: Tecnologie

Progetto: Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali

Work package: Local Energy District

Linea di attività: LA1.41 - Servizi Urbani Energivori: Applicazione approccio numerico operativo per “early flash flood warning” a infrastrutture e siti sensibili in aree urbane)

Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Responsabile del Work package: Claudia Meloni, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione “*Applicazione approccio numerico operativo per “early flash flood warning” a infrastrutture e siti sensibili in aree urbane*”.

Responsabile scientifico ENEA: Maurizio Pollino

Responsabile scientifico Università dell'Aquila: Marco Verdecchia

Indice

Sommario	4
1 Introduzione	5
2 L'approccio metodologico	7
3 Implementazione degli algoritmi di allerta	9
3.1 Le mappe di allarme idrologico	10
3.1.1 Indice BDD	12
3.1.2 Indice CAI	13
3.2 Mappe dei siti sensibili e visualizzazione di punti di allerta	15
3.3 Possibile predizione dei fenomeni franosi	20
4 Conclusioni	25
5 Riferimenti bibliografici	26
6 Abbreviazioni ed acronimi	27
7 Curriculum scientifico dei partecipanti	28

Sommario

Il presente Report descrive le attività svolte dal Dipartimento di Scienze Fisiche e Chimiche (DFSC) dell'Università degli Studi dell'Aquila nell'ambito dell'Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA, Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021. In particolare, si tratta della Linea di Attività LA.1.41 del Work package Local Energy District (WP1) nell'ambito del Progetto “Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali”.

Le attività si sono prevalentemente incentrate sulla generalizzazione degli algoritmi sviluppati e calibrati durante il precedente triennio di attività della Ricerca di Sistema Elettrico (PAR2015-2018). Negli anni precedenti, infatti, è stato messo a punto un approccio numerico attraverso il quale, partendo dagli indici di allarme prodotti dalle simulazioni operative del modello CHyM, si ottengono dei livelli discreti di allarme specializzati per i singoli siti ove sono posizionate le principali cabine ad alta potenza dell'ACEA, operatore di distribuzione elettrica scelto come test case. Con l'ulteriore sviluppo implementato in queste nuove annualità, l'approccio proposto viene generalizzato ad ogni singola cella elementare dell'area urbana di Roma ed i siti che possono essere segnalati come soggetti a fenomeni critici sono tutti quelli di interesse considerati di interesse strategico ovvero vitali sia per il sistema elettrico sia per altri sistemi infrastrutturali critici, come la rete stradale.

Anziché tabelle che indicano livelli di allerta per i siti selezionati, la nuova implementazione consente di ottenere diverse mappe di tutta l'area urbana; per ogni tipologia di criticità, vengono indicati con diverso colore gli elementi della griglia dove esiste un “punto di interesse” che potrebbe essere soggetto ad evento idrologico severo. Le mappe si ottengono incrociando le mappe di allarme idrologico ed i diversi *layer* in cui sono codificate le informazioni su siti sensibili della città o delle strutture ACEA.

1 Introduzione

L'incalzare dei cambiamenti climatici e soprattutto l'incremento, ormai ampiamente osservato oltre che previsto, dei fenomeni estremi, pone nuove sfide alle applicazioni tese a prevedere gli effetti che i fenomeni meteorologici possono avere sulle infrastrutture strategiche ed irrinunciabili.

Al fine di stimare in anticipo eventuali problematiche ed orientare la gestione di eventuali situazioni critiche, pertanto, tali nuovi scenari impongono la necessità di prevedere non il semplice susseguirsi dei fenomeni, bensì gli effetti pratici che tale sequenza può provocare sulle strutture produttive o sulle infrastrutture critiche per l'ambiente urbano, segnatamente le arterie di collegamento stradale, le strutture per la produzione e la distribuzione di energia.

Attualmente, l'approccio quasi universalmente adottato si basa sulla semplice osservazione o previsione delle precipitazioni e delle temperature in una serie di punti più o meno rappresentativi, ma questo approccio risulta con tutta evidenza troppo semplificato per una efficace previsione degli effetti al suolo; basti, a tale proposito, citare l'evidenza che le criticità idrogeologiche si generano per la complessa distribuzione spaziale e temporale delle precipitazioni e non già dal semplice valore previsto o osservato nel punto che si ritiene critico.

Nell'ambito della presente Linea di Attività, pertanto, è stato sviluppato e sperimentato un approccio più sofisticato e quindi più fruibile per una efficace gestione delle emergenze. Esso consente di individuare quali punti di un sistema sensibile (ad esempio la rete stradale o le cabine primarie di una rete di distribuzione elettrica) possono essere soggetti a stress rilevanti. I risultati di ottenuti, quindi, sono stati condivisi con le altre Linee di Attività del presente WP (grazie al ruolo nodale della piattaforma CIPCast-ER nella LA1.36, LA1.37 e LA1.38, cfr. Report RdS/PTR(2021)/028, "Sperimentazione di applicazioni per il monitoraggio della qualità e l'analisi della sicurezza delle infrastrutture urbane"), al fine di supportare lo sviluppo di procedure che, attraverso l'utilizzo di complessi algoritmi matematici, permettono di valutare le opportune azioni per ridurre o, se possibile, annullare gli effetti del "failure" previsto su uno o più elementi dei sistemi infrastrutturali considerati.

Per quanto riguarda il primo aspetto, una serie di importanti risultati è stata ottenuta nel precedente triennio di attività (Accordo di Collaborazione tra ENEA e Dipartimento di Scienze Fisiche e Chimiche (DFSC), Università degli Studi dell'Aquila, nell'ambito della Ricerca di Sistema Elettrico - PAR 2015-2018). In particolare si è dimostrato come una ottimizzata sequenza di algoritmi sia in grado di prevedere, con ottima approssimazione e sufficiente

affidabilità, i nodi delle cabine primarie di una rete di distribuzione elettrica dove è ragionevole aspettarsi situazioni critiche in conseguenza di eventi meteo estremi.

Tale approccio, validato dalla simulazione e dalla valutazione di vari casi studio, è stato pertanto ripreso nell'ambito della presente Linea di Attività, ampliandolo ed estendendolo all'analisi di altri elementi della rete elettrica e del sistema viario.

In particolare, è stata considerata una sequenza di punti di interesse rappresentativi del sistema di trasporto e quindi ritenuti sensibili o critici.

Un aspetto particolarmente innovativo, non solo nell'ambito di questa Linea di Attività, riguarda la possibilità di predire i pixel della mappa che possono essere soggetti a fenomeni franosi. Si tratta in effetti di un obiettivo che va oltre i risultati attesi in questa fase del progetto e che apre la strada verso future implementazioni che consentano l'estensione dell'approccio a zone più vaste ove tali fenomeni sono più critici e dove la salvaguardia del territorio e delle strutture/infrastrutture ivi ricadenti richiede una attenta valutazione delle effettive possibilità di "occorrenza" dei fenomeni franosi.

2 L'approccio metodologico

L'obiettivo delle attività è consistito essenzialmente nel realizzare la sovrapposizione di più *layer* numerici al fine di produrre una mappatura dei punti strategici che potrebbero, in un arco temporale "futuro" di 24-48 ore, essere soggetti a fenomeni idrogeologici critici. Si tratta quindi di *tool* operativi, che devono essere in grado di funzionare in automatico, a valle delle previsioni meteorologiche ed idrologiche.

L'implementazione è stata articolata in tre fasi distinte:

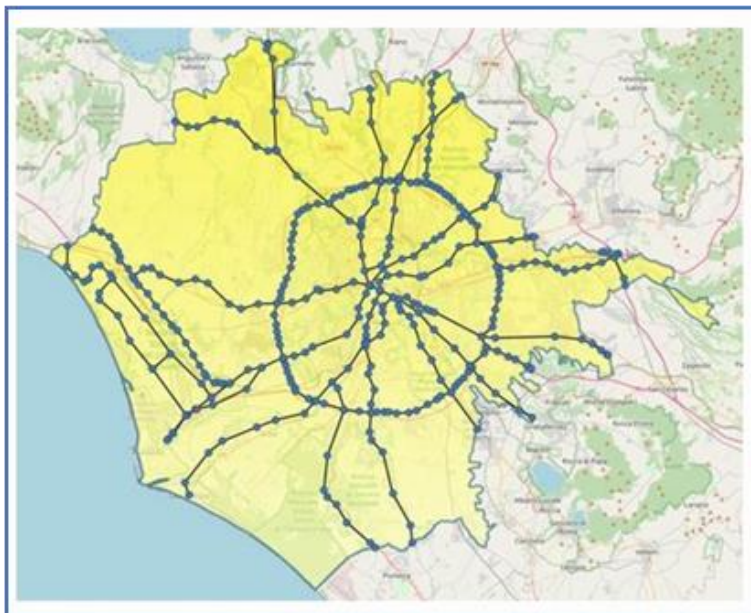
1. acquisizione dei dati;
2. simulazioni numeriche idro-meteorologiche;
3. incrocio dei risultati delle previsioni con la mappa dei punti strategici.

Lo step di partenza è costituito dalla catena operativa del CETEMPS¹, di cui qui si sfruttano gli output numerici, la quale catena prevede l'utilizzo di modelli meteorologici ad alta risoluzione in grado di fornire la previsione di mappe orarie di pioggia e temperature. Sulla base di tali scenari termici e di precipitazione, il modello idrologico calcola la portata sui vari segmenti del reticolo idrografico e, quindi, gli algoritmi sviluppati in questa Linea di Attività consentono di visualizzare i punti strategici che saranno verosimilmente soggetti a situazioni critiche.

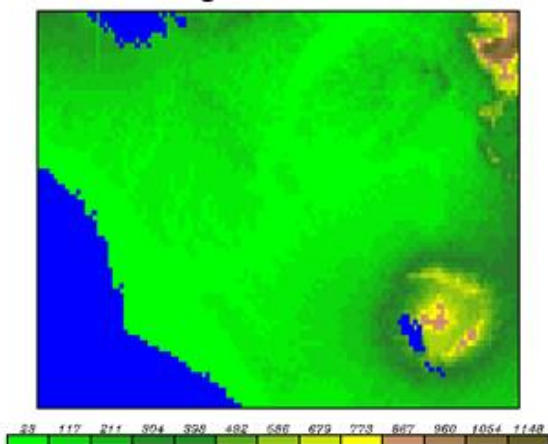
Una panoramica estremamente sintetica del lavoro realizzato è riportata nella Figura 1. I dati di partenza sono costituiti dalla mappa dell'area urbana di Roma in cui sono posizionati i punti considerati strategici (cabine primarie dell'ACEA, principali vie di comunicazione, punti strategici per il turismo e la vita sociale, punti strategici per le attività di soccorso, eccetera). La matrice del Modello Digitale del Territorio (mostrata nel pannello centrale della Figura 1) è il dato di partenza che consente al modello idrologico di produrre le predizioni delle portate dei fiumi; queste portate producono poi un *warning* o un allarme se superano una certa soglia considerata critica e se ciò avviene in corrispondenza di uno dei punti di interesse o punti strategici dell'area urbana compare un simbolo grafico appropriato.

¹ Center of Excellence Telesensing of Environment and Model Prediction of Severe events
<http://cetemps.aquila.infn.it/>

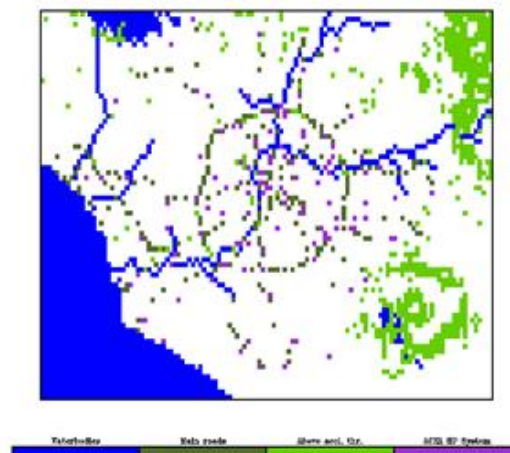
Area di studio



DEM – Digital Elevation Model



Warning type map



CHyM Graphic Lab

Figura 1. Panoramica del lavoro svolto: i dati di partenza sono costituiti dalla mappa dei punti strategici dell'Area urbana di Roma (pannello in alto) e dal modello digitale del territorio (DEM) della stessa area (pannello al centro). Sulla base del DEM, il modello idrologico ricava la rete drenante dove viene fatta la simulazione idrologica operativa per la previsione della portata che viene incrociata con i punti della griglia dove sono posizionati i punti critici (pannello in basso).

3 Implementazione degli algoritmi di allerta

Nei seguenti paragrafi verranno descritti tre distinti aspetti, o fasi, nell'elaborazione e produzione delle mappe di allerta.

Nel paragrafo 3.1 è sommariamente descritta la complessa catena di simulazioni che, partendo dalle previsioni meteorologiche a scala globale, le specializza prima in una previsione ad alta risoluzione sul centro Italia e quindi, forzando ulteriormente la risoluzione spaziale, arriva a prevedere la portata dei fiumi in tutti i bacini idrografici che si trovano all'interno del dominio simulato.

Nel paragrafo 3.2 analizziamo le procedure di acquisizione dei dati sensibili e la procedura numerica attraverso cui questi dati sono acquisiti sulla griglia operativa del modello CHyM (CETEMPS Hydrological Model).

Infine, nella sezione 3.3 è descritta la complessa procedura algoritmica che, partendo dalle *features* del modello idrologico, potrebbe consentire una efficace mappatura delle zone verosimilmente esposte a fenomeni franosi o comunque critici dal punto di vista della stabilità del suolo.

3.1 Le mappe di allarme idrologico

L'origine di tutte le simulazioni e delle applicazioni qui descritte è costituita dalla catena operativa di previsione predisposta e funzionante presso il Centro di Eccellenza per l'integrazione di Tecniche di Telerilevamento e Modellistica Numerica per la Previsione di Eventi Meteorologici Severi (CETEMPS) dell'Università dell'Aquila.

Il primo step di questa catena [10] è costituito dall'utilizzo di modelli meteorologici ad area limitata che, partendo dalle simulazioni a scala globale effettuate dai grandi centri di previsioni (in particolare dall'ECMWF² europeo e dall'NCEP³ degli Stati Uniti), specializzano le previsioni del tempo su vari domini geografici della nostra penisola. In particolare, vengono simulate le regioni del centro Italia in un dominio che contiene per intero il bacino del Tevere e tutti i fiumi che insistono nella zona urbana di Roma. Le simulazioni vengono effettuate almeno due volte al giorno a distanza di 12 ore, e ciò assicura una ragionevole copertura in caso di effettivo utilizzo operativo degli algoritmi elaborati per questo progetto. Un'ulteriore ridondanza del sistema del CETEMPS consiste nel simultaneo utilizzo di due distinti modelli meteorologici ad area limitata, MM5⁴ e WRF⁵, entrambi utilizzati ad una risoluzione di qualche chilometro; anche questa ridondanza di strumenti modellistici contribuisce ad "irrobustire" la base di dati su cui le previsioni qui descritte si appoggiano.

Le previsioni meteo vengono sfruttate, segnatamente per i campi di precipitazione e temperatura previsti, al fine di forzare le simulazioni idrologiche con il modello CHyM che è stato a lungo validato ed utilizzato sia per scopi operativi [1,4,9,10], sia per valutare gli effetti dei cambiamenti climatici sul ciclo idrologico [3]. Quest'ultimo modello è stato sviluppato integralmente presso il centro di Eccellenza CETEMPS dell'Università dell'Aquila e, in considerazione delle applicazioni che verranno descritte in seguito, è utile dare alcune informazioni sulle sue caratteristiche.

CHyM può lavorare a qualunque risoluzione spaziale, in un qualunque dominio del globo; questa particolare *feature*, peculiare a ben pochi modelli idrologici, discende dal fatto che la rete drenante viene direttamente calcolata a partire dalla matrice del Modello Digitale del Terreno (DEM). In maniera nativa il modello del CETEMPS calcola le direzioni di scorrimento per ogni cella elementare e, attraverso una serie di algoritmi originali ed ampiamente validati [2], risolve le singolarità della matrice DEM arrivando a ricostruire la rete di drenaggio del

² European Centre for Medium-Range Weather Forecasts: <https://www.ecmwf.int/>

³ National Centers for Environmental Prediction: <https://www.weather.gov/ncep/>

⁴ Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model: <https://www2.mmm.ucar.edu/mm5/overview.html>

⁵ Weather Research and Forecasting (WRF) Model: <https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model>

dominio geografico simulato. In cascata con questa elaborazione, è possibile calcolare quella che gli idrologi chiamano *matrice di accumulazione*, si tratta di un *array* in cui ogni elemento rappresenta l'area a monte drenata dalla cella specifica; ciò consente, come vedremo meglio nell'ultimo paragrafo, di distinguere i punti di griglia che drenano una area maggiore o minore di una certa soglia, potendo quindi selezionare le zone del territorio dove il deflusso delle acque meteoriche avviene attraverso canali da quelle dove il ruscellamento avviene in superficie e quindi si possono ipotizzare fenomeni franosi.

Un'altra caratteristica peculiare del modello è quella di poter assimilare dati eterogenei di precipitazione in maniera gerarchica ricostruendo, per ogni ora della simulazione idrologica, il più affidabile campo di pioggia da utilizzare come forzante del sistema idrologico. Questa peculiarità rende CHyM particolarmente adatto alle applicazioni operative in cui la simulazione deve comprendere sia un intervallo di tempo pregresso, rispetto al momento in cui il *run* viene effettuato, sia almeno 24 ore "future". Grazie all'algorithm, basato sulla teoria dei cosiddetti automi cellulari [6], per le ore "trascorse" di simulazioni, il modello acquisisce in modalità operativa i dati della rete pluviometrica, i dati dalle stime radar [5] oltre ai dati pluviometrici ottenuti da stime delle osservazioni da satellite della piattaforma MODIS⁶ (*MODerate resolution Imaging Spectroradiometer*). I vari set di dati sono acquisiti, per ogni ora di simulazione, in maniera gerarchica, assumendo quindi che le osservazioni a terra da pluviometro siano più affidabili delle stime radar, le quali a loro volta sono meno attendibili della mappatura derivante dai dati della piattaforma satellitare. In questa maniera, il modello ottiene la migliore mappatura possibile della precipitazione sui bacini simulati e ciò è fondamentale poiché le incertezze delle precipitazioni meteorologiche sono un aspetto molto critico che rischia di inficiare in maniera sostanziale l'affidabilità delle previsioni idrologiche.

CHyM è, inoltre, un modello distribuito *grid-based*; il risultato delle simulazioni, quindi, è essenzialmente dato dai valori di umidità del terreno e di portata in ogni punto del dominio simulato, ovvero in ogni segmento del reticolo idrografico in esso contenuto.

Per scopi operativi, tuttavia, il valore della portata non è di per sé sufficiente a determinare un livello di allerta: in altre parole la portata critica che provoca l'esondazione di un corso d'acqua è assolutamente diverso per ogni segmento della rete drenante e quindi il valore della portata non è il solo dato indispensabile per indicare se, in un determinato punto di griglia, ci sia da aspettarsi una situazione di pericolo o meno.

Per superare questa difficoltà numerica e concettuale, nel corso degli anni, i ricercatori del CETEMPS hanno testato e sviluppato due diversi indici che, sulla base dei valori della portata

⁶ <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/>

predetta e della precipitazione drenata da ogni cella elementare, produce dei livelli di allerta che, sulla base di un gran numero di test e di casi studio, risultano essere significativi e generali, ovvero tali da essere applicati in qualunque zona di territorio. Senza entrare in dettagli troppo specifici e quantitativi, per i quali rimandiamo alle ultime pubblicazioni sull'argomento [1,4], descriviamo qui concettualmente la modalità di calcolo e l'idea di base che giustifica l'utilizzo di questo approccio numerico.

3.1.1 Indice BDD

Il primo indice è chiamato BDD, acronimo di *Best Discharge-based Drainage alarm index* ed è calcolato sulla base della portata massima prevista in un certo intervallo di tempo.

L'idea di base è che il valore critico della portata debba essere dedotto dalla stima della sezione del fiume nel punto considerato. In idrologia si considera che la sezione trasversale di un fiume, un torrente o anche un piccolo ruscello sia proporzionale all'area totale drenata da quella sezione idraulica. Molti sono i lavori della letteratura scientifica che giungono a questa conclusione, per una referenza di carattere generale si veda ad esempio il volume di Singh e Frevert [7]. In base a questa osservazione, il BDD viene calcolato come il rapporto tra il valore della portata ed il cosiddetto raggio idraulico della sezione della fiume, essendo quest'ultima quantità una funzione dell'area drenata che può essere calcolata a partire dai moduli del modello CHyM.

Un primo esempio che mostriamo è riportato nella Figura 2. Qui le soglie di allerta per l'indice BDD sono state abbassate per poter meglio rendere, visivamente, l'immediatezza dell'approccio di allerta proposto. Ai segmenti del Tevere e degli altri torrenti sono sovrapposti i punti di griglia corrispondenti ai tratti delle principali arterie stradali.

BDD-based warning map – October 16, 2020 h: 23.00

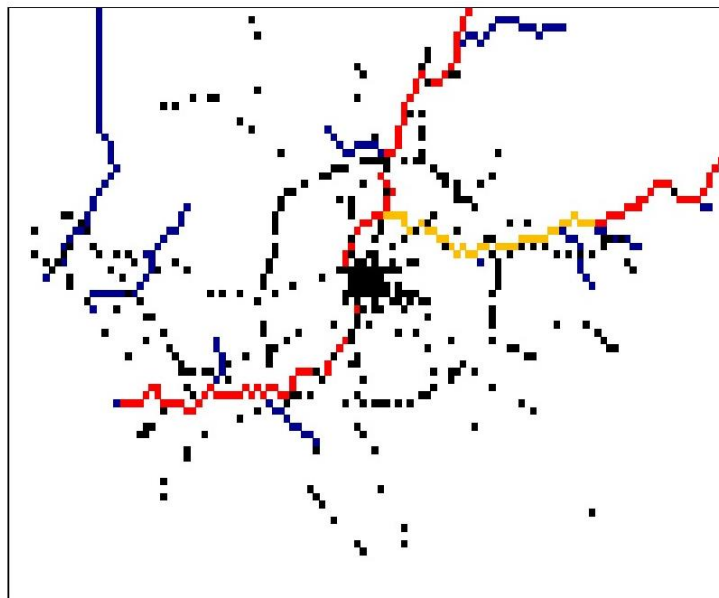


Figura 2. Campo dell'indice BDD come calcolato dal modello CHyM per il caso studio del 16 ottobre 2020. Ai valori dell'indice plottati lungo i principali fiumi e torrenti che insistono nella zona urbana di Roma, sono sovrapposti i punti griglia che corrispondono alle principali vie di comunicazione.

3.1.2 Indice CAI

L'altro indice è di natura più empirica e viene chiamato *CAI (CHyM Alarm Index)*. Questo parametro viene calcolato in base alla precipitazione media drenata da ogni singola cella. In estrema sintesi: fissato un punto, calcoliamo quanta precipitazione cade nel bacino a monte del punto selezionato (m^3); questa quantità viene poi divisa per tutta l'area drenata dal punto stesso. L'indice così calcolato ha una semplice interpretazione fisica e rappresenta la precipitazione media caduta a monte del punto stesso. Il calcolo viene fatto su un intervallo di tempo che differisce per ogni punto del bacino e tale intervallo corrisponde al tempo medio di corruzione della cella considerata. L'applicazione degli indici a molti casi studio [1,4] mostra come entrambi gli algoritmi proposti siano in grado di selezionare in maniera efficace e tempestiva i segmenti della rete drenante che sono soggetti a maggior rischio.

Anche per questo indice è riportato un esempio nella Figura 3. Pure in questo caso, le soglie di allerta sono state abbassate per poter meglio rendere, visivamente, l'immediatezza

dell'approccio di allerta proposto. I punti di griglia corrispondenti ai tratti delle principali arterie stradali sono sovrapposti ai segmenti del Tevere e degli altri torrenti.

CAI-based warning map – October 16, 2020 h: 23.00

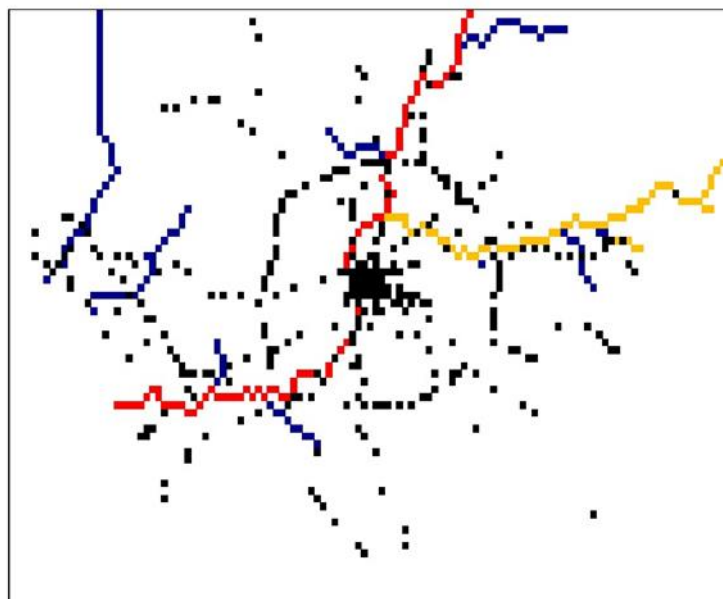


Figura 3. Campo dell'indice BDD come calcolato dal modello CHyM per il caso studio del 16 ottobre 2020. Ai valori dell'indice plottati lungo i principali fiumi e torrenti che insistono nella zona urbana di Roma, sono sovrapposti i punti griglia che corrispondono alle principali vie di comunicazione.

3.2 Mappe dei siti sensibili e visualizzazione di punti di allerta

Per poter incrociare i dati ed ottenere la mappatura dei punti sensibili soggetti a possibili rischi idrogeologici, le informazioni circa i punti critici vanno riportate sulla stessa griglia del modello CHyM utilizzata per le simulazioni numeriche.

A tale scopo, il passo preliminare indispensabile, è stato quello di “ritagliare” l'output di CHyM per poter poi sfruttare tutte le *feature* del modello nella fase di elaborazione e predizione dei punti di allerta. Occorre precisare che una simulazione idrologica non può essere effettuata su un dominio piccolo a piacere; affinché le variabili idrologiche simulate, ed in particolare la portata, siano verosimili, è infatti indispensabile che sia simulato almeno l'intero bacino a monte dei principali corsi d'acqua; nel caso specifico della zona urbana di Roma, ovviamente il Tevere con i suoi oltre 400 km², il Liri e l'Aniene. Per tale ragione, il modello CHyM viene impiegato su una zona geografica che comprende gran parte dell'Italia Centrale; più specificatamente il dominio geografico simulato è compresa nel *range* 41.16-43.97 di Latitudine Nord e 11.31-14.79 di Longitudine Est; la griglia è costituita da un reticolo di 581 x 472 punti con una risoluzione orizzontale di circa 850 metri.

L'output così prodotto contiene tutti i campi di temperatura, precipitazione, portata e umidità del terreno, a risoluzione oraria, calcolati dal modello e può essere utilizzato dai post-processor che ne elaborano ulteriormente il contenuto per poter fornire visualizzazioni e sintesi della predizione tali da poter essere facilmente utilizzati dagli utenti (Protezione Civile, Autorità amministrative, Gestori di infrastrutture e servizi, ecc.) [1,6].

Questa post-elaborazione è di fondamentale importanza perché ha lo scopo peculiare di rendere immediata l'interpretazione dei risultati ai non specialisti; in parole semplici si tratta di “ridurre” a pochi grafici immediatamente intellegibili, un output costituito mediamente da qualche centinaio di milioni di numeri. Affinché sia possibile utilizzare questi *tool* grafici e numerici, è quindi necessario produrre un output “fittizio”, come se la simulazione fosse stata condotta su un sotto-dominio arbitrario e, nella fattispecie, l'area urbana della capitale e le sue zone limitrofe. A questo scopo è stato sviluppato un apposito *tool* che consente questa operazione.

Questo output fittizio di cui abbiamo parlato, viene prodotto nella maniera più generale possibile e questo è un punto cruciale che è opportuno sottolineare: qui e nelle fasi successive delle attività si è cercato sempre di mantenere, come caratteristica architettonica di tutte le parti di software, la caratteristica di essere generalizzabile, utilizzabile ed applicabile a qualunque contesto geografico. Quindi, l'approccio qui presentato e descritto è estendibile come dominio, ma anche “esportabile” a qualunque altra realtà urbana e non.

Il modulo CHyM2RSE opera quindi sull'output di CHyM creando un *file* di dati su cui lo stesso CHyM, con i suoi *post-processors*, è in grado di lavorare per produrre output *user-oriented* [6]. Nel caso delle applicazioni qui mostrate l'area simulata è compresa nel *range* 41.16-43.97 di Latitudine Nord e 12.12-12.85 di Longitudine Est; la griglia è costituita da 123 x 76 (lon x lat) punti e la risoluzione spaziale è sempre di circa 850 metri. Malgrado l'area sia piuttosto limitata, l'orografia della zona è alquanto complessa ed il modello digitale del territorio va dal livello del mare fino a 1170 metri.

Su questa griglia dove sono definiti i campi di CHyM, dobbiamo quindi riportare le informazioni su dove si trovano i punti strategici, le principali arterie, i punti di interesse di vario tipo (POI, *point of interest*), gli impianti critici dell'ACEA, le aree dove scorrono i corsi d'acqua e quelle adiacenti ove ci si aspetta le situazioni più critiche in caso di esondazioni di fiumi o torrenti. Come si intuisce facilmente, si tratta di una serie di *layer* di informazioni che sottendono a diversissime applicazioni possibili, indirizzate all'utilizzo da parte di diversi enti, amministrazioni territoriali o operatori; è quindi necessario disegnare una architettura dell'approccio numerico che ne consenta sviluppi al momento neanche ipotizzabili. A tale scopo si è disegnato e realizzato il software, mantenendo tre essenziali caratteristiche che così possono essere riassunte:

- 1) tutti i dati dei vari *layer* di informazioni sono definiti e memorizzati in un solo *array* sulla stessa griglia utilizzata per le simulazioni idrologiche;
- 2) tutti i *layer* dipendenti dalla morfologia del territorio, devono essere direttamente calcolati da CHyM a partire dal modello digitale del territorio e dallo schema di scorrimento elaborato dal modello stesso;
- 3) gli algoritmi di *warning* e di allerta vengono reiterati su tutta la griglia del modello, ed elaborati a partire dall'insieme dei parametri a cui abbiamo fatto riferimento in precedenza.

Per quanto riguarda il primo punto è quindi necessario utilizzare uno schema di memorizzazione dei dati che consenta di non “esplodere” il numero di *array* da dimensionare, ciò renderebbe l'approccio troppo complesso da sviluppare ulteriormente, oltre che meno robusto dal punto di vista della sua effettiva portabilità. Per queste ragioni si è optato di riempire una matrice di interi, in cui il valore numerico, fornito o calcolato per ogni punto di griglia, rappresenta una serie di flag (fino a 32) ognuna delle quali memorizza l'occorrenza o no di una certa situazione; ad esempio una certa flag sarà 1 (oppure 0) se nella cella si trova (o non si trova) una cabina primaria di ACEA. Il valore numerico memorizzato nella matrice corrisponde all'intero dato dalla sequenza di bit che rappresentano le varie *flag*. Vediamo

allora, con maggior dettaglio, il valore delle singole *flag* ed il modo in cui ciascuna di esse viene acquisita o calcolata:

- Flag 1 – Il primo bit individua i punti in cui è presente un corso d'acqua (fiume, torrente, ruscello o anche un piccolo canale). La *flag* viene calcolata dal modello CHyM in base alla ricostruzione numerica della rete drenante; in particolare questa *flag* viene “alzata” per tutti i punti di griglia che drenano almeno un certo *threshold* solitamente fissato intorno 100 km² [7].
- Flag 2 – Il bit individua i punti corrispondenti al mare o a laghi. Il valore della *flag* viene calcolato in base alla matrice di CHyM che contiene la tipologia di suolo.
- Flag 3 – Il bit individua i punti di griglia in cui sono localizzate le grandi vie di comunicazioni; nell'esempio riportato in Figura 4 si riconosce bene il percorso del Grande Raccordo Anulare ed altre principali arterie critiche per la viabilità.
- Flag 4 – Il bit individua i punti di griglia che potrebbero essere soggetti a fenomeni franosi o di smottamento; in particolare questo bit è calcolato direttamente dal modello CHyM in base al valore dell'acclività nella direzione di massima pendenza. Si veda, per maggiore dettaglio la discussione riportata nel prossimo paragrafo.
- Flag 5 – Il bit individua i punti dove si trovano le cabine ACEA; nella presente versione i dati forniti riguardano la localizzazione delle sole cabine primarie.
- Flag 6 – Il bit individua i punti dove si trovano le aree alluvionali o comunque le zone che, in base al valore della *flag* 1, si trovano in prossimità dei corsi d'acqua. Come nel caso della prima *flag*, questo bit è calcolato a partire dalle matrici elaborate dal modello CHyM.
- Flag 7 – Questo bit seleziona i punti di griglia corrispondenti a siti strategici o sensibili (Ospedali, edifici governativi, caserme, etc.) la mappatura è derivata dai dati disponibili sulla Piattaforma CIPCast-ER (sviluppata da ENEA nell'ambito delle Linee di Attività LA36-38).
- Flag 8 – Questa *flag* localizza i punti di interesse POI (Scuole, Musei, Farmacie, Chiese, Banche, ecc.) la mappatura è derivata dai disponibili sulla Piattaforma CIPCast-ER (sviluppata da ENEA nell'ambito delle Linee di Attività LA36-38).

- Flag 9 – L'ultima *flag* è alzata per i punti con possibilità di frane non nulla. La mappatura della pericolosità per frane prodotta dal Ministero dell'Ambiente nell'ambito del PAI⁷; per maggiori particolari si veda la discussione su questo allarme specifico nell'ultimo paragrafo.

Una visualizzazione sintetica di questa matrice è riportata nella Figura 4.

Warning type map

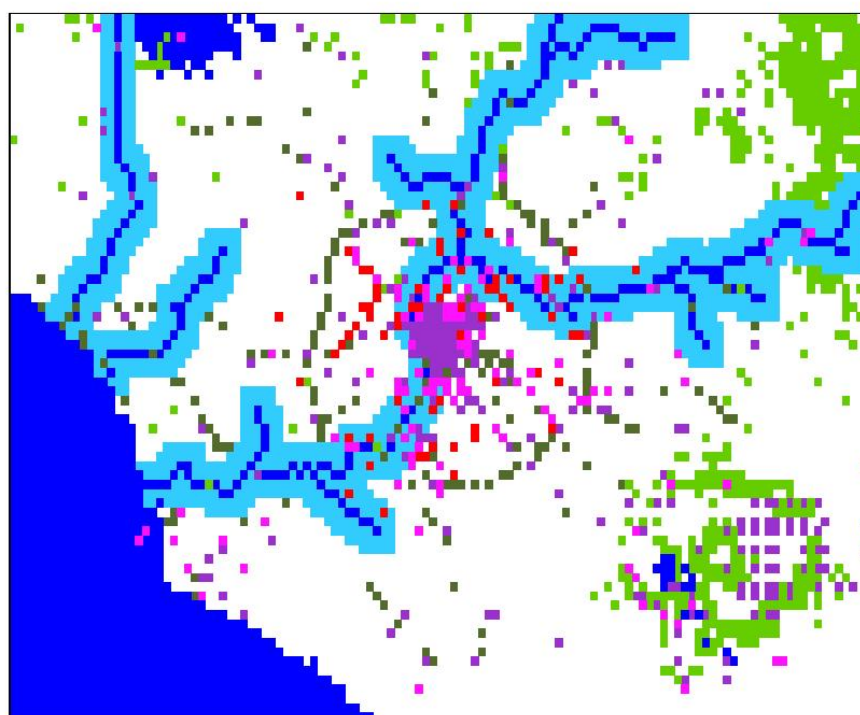


Figura 4. Mappa degli array di CHyM integrata con i dati sui punti strategici e di interesse. Dagli algoritmi del modello vengono inoltre calcolati i punti corrispondenti ai corsi d'acqua e le aree alluvionali che sarebbero immediatamente soggette alla esondazione dei fiumi. Sono riportati i fiumi e laghi (blu), le strade principali (verde scuro), la localizzazione delle cabine ACEA, (violetto), le area alluvionali (celeste), i punti di interesse (violetto) e quelli ritenuti strategici (rosso).

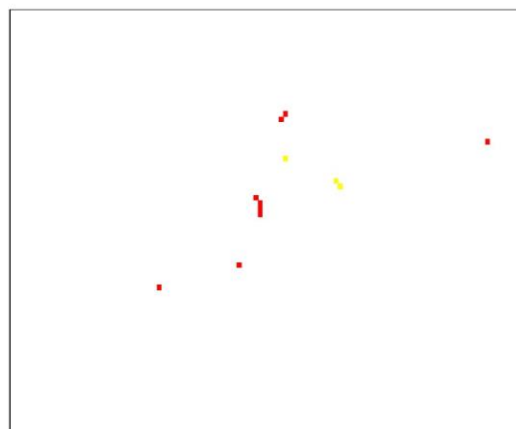
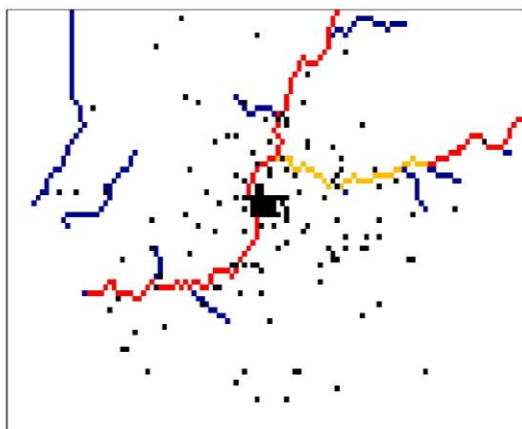
⁷ Mosaicatura nazionale ISPRA (Elaborazione v. 3.0 – Dicembre 2017) delle aree a pericolosità da frana dei Piani di Assetto Idrogeologico (PAI), redatti dalle Autorità di Bacino Distrettuali e, per i territori di rispettiva competenza, dalle Province Autonome di Trento e Bolzano <https://idrogeo.isprambiente.it/app/>

Lo step finale è a questo punto costituito dall'incrocio dei dati visualizzati nella Figura 3 e nella Figura 4, ovvero dalla situazione idrologica, dalle peculiarità del territorio (punti sensibili e pericolosità) e dalle caratteristiche geomorfologiche del territorio che sono codificate nella matrice di flags.

Un esempio applicativo è riportato nella mappa operativa riportata in Figura 5; qui le soglie di allarme sono state abbassate per poter visualizzare una possibile situazione di allarme che, in effetti, non si è verificata e non sarebbe stata prevista nel caso studio mostrato. Nel pannello a destra la mappatura delle cabine ACEA è sovrapposta alla mappa di allarme lungo i principali corsi d'acqua (in rosso allarme, in giallo *warning*); nel pannello a destra sono evidenziate le cabine che potrebbero essere soggette a fenomeni critici.

BDD-based warning map – October 16, 2020 h: 23.00

BDD-based warning map – October 16, 2020 h: 23.00



ACEA HP System

ACEA HP System

Figura 5. La mappa di allarme idrologica prodotta sulla base dell'indice BDD (pannello a sinistra) e localizzazione delle cabine primarie ACEA che si prevede siano sottoposte a maggiore stress (pannello a destra). Le soglie di allarme sono state abbassate per poter visualizzare una possibile situazione di allarme che, in effetti, non si è verificata e non sarebbe stata prevista nel caso studio mostrato.

3.3 Possibile predizione dei fenomeni franosi

L'obiettivo ulteriore, che estende l'approccio descritto nei paragrafi precedenti, tende a rendere possibile una efficiente mappatura dei punti del territorio che, in seguito agli eventi meteorologici attesi, potrebbero essere interessati da fenomeni franosi.

Occorre precisare che l'area urbana di Roma, che qui viene simulata e su cui gli algoritmi sono validati, non è criticamente interessata da movimenti superficiali del terreno. Tuttavia questa classe di fenomeni interessa in maniera evidente e strategica gran parte del territorio italiano, per cui l'approccio previsionale proposto può essere di grande importanza per la predizione e prevenzione di tali eventi, sia per poter difendere il territorio e la sua integrità, sia per limitare, o sperabilmente azzerare, gli altissimi costi di natura economica e umana che questa fenomenologia comporta.

Per implementare in maniera generale un approccio numerico adatto agli obiettivi che abbiamo accennato, occorre tener conto simultaneamente di tre fattori indipendenti:

- 1) Lo scenario meteorologico previsto, possibilmente integrato con dati osservativi in tempo reale, e la conseguente mappa di drenaggio che interessa le singole porzioni di territorio;
- 2) La vulnerabilità di ogni elemento della griglia spaziale, in ragione della sua effettiva possibilità di essere interessato a fenomeni franosi. Ciò dipende essenzialmente da due fattori: la pendenza, o acclività, massima di ogni porzione elementare, e la morfologia delle zone immediatamente adiacenti che determinano lo scorrimento superficiale delle acque meteoriche con possibili accumuli di acqua al di fuori della naturale rete drenante.
- 3) La vulnerabilità o suscettibilità delle singole porzioni del suolo a fenomeni di frane, smottamenti, sfaldamenti o cedimenti.

Tutti e tre questi aspetti vanno tenuti presenti ed integrati al fine di una previsione di pericolosità, e quindi ai fini di ottenere una mappatura realistica delle zone dove si devono concentrare interventi di soccorso o di prevenzione. Sottolineiamo come i tre elementi di conoscenza che abbiamo sinteticamente elencati rappresentino settori, certamente complementari dal punto di vista dello scopo che qui ci si prefigge, ma molto distinti in riferimenti al sapere ed alle conoscenze specifiche che si richiedono per la loro comprensione ed elaborazione. Se da un lato ciò comporta una evidente complessità dal punto di vista dell'implementazione di un algoritmo di allerta, dall'altro lato la molteplicità degli aspetti considerati consente di essere ragionevolmente ottimisti per quanto riguarda la sua efficacia,

poiché sono tre indipendenti e distinte osservazioni o elaborazioni che concorrono al livello operativo di allarme.

Vediamo allora in maggiore dettaglio ognuno dei tre elementi su cui si basa l'algoritmo proposto e, per ciascuno di essi, indichiamo l'approccio operativo che è richiesto e che abbiamo implementato.

Come sintetizzato nel paragrafo 3.1, l'input di tutta la catena meteo-idrologica-idraulica è costituita dal campo di precipitazione ricostruito a partire dall'integrazione di dati osservati e dati predetti dai modelli meteorologici. Solitamente per formulare una previsione di pericolo in una determinata porzione di territorio si prende in considerazione l'osservazione della pioggia in quel punto, non importa se osservata o predetta dai modelli. Nel caso delle presenti attività l'approccio proposto è molto più sofisticato: ad innescare il movimento franoso non è semplicemente la precipitazione caduta in un elemento di griglia, ma il complesso della precipitazione che l'elemento di territorio si trova a drenare non avendo le caratteristiche idrauliche e geomorfologiche. In altre parole: quando il campo meteorico è di livello "sostenibile", tutta la precipitazione confluisce rapidamente all'interno della rete drenante "costruita" dalla natura nel corso dei secoli; al contrario quando l'evento è eccezionale il ruscellamento delle rilevanti precipitazioni avviene lungo pendii e segmenti di territorio che non sono normalmente deputati allo scorrimento e ciò genera, quasi inevitabilmente l'instabilità di quelle sezioni di territorio e l'occorrenza di fenomeni critici, frane smottamenti etc.

Per individuare questi elementi spaziali soggetti a criticità, suggeriamo di utilizzare, per ogni punto di griglia l'integrale della precipitazione drenata come per l'allarme delle esondazioni dei fiumi ma, in questo caso, "rovesciando" l'algoritmo ovvero considerando come territorio soggetto a frane quello avente un'area drenata inferiore a pochi chilometri quadrati. Il valore di questo *threshold* è giustificato dalla osservazione che al di sopra di questo valore si viene a formare un canale drenante (*channel flow*), mentre al di sotto di questa soglia lo scorrimento è prevalentemente di tipo superficiale (*surface flow*); per una referenza generale ed esaustiva di quanto affermato si veda Singht and Frevert [6]. In altri termini, questo approccio ci consente di selezionare numericamente la variegata porzione di suolo in cui non esistono canali di scorrimento.

Un ulteriore parametro è costituito dalla possibilità fisica di una certa porzione di terreno di franare o scorrere. Ciò è naturalmente legato alla forza di gravità e quindi il rischio diventa tanto maggiore, quanto più è grande la pendenza, o acclività del punto. Anche questa grandezza può essere facilmente calcolata a partire dai parametri del modello CHyM; come

accennato in precedenza il modello calcola la direzione di scorrimento come quella, tra le otto possibili di punto di griglia, che risulta avere la pendenza maggiore; in base al valore numerico di questa pendenza viene quindi calcolata la velocità di scorrimento dell'acqua sulla superficie o dentro il canale, risultando questa una funzione sinusoidale dell'acclività stessa [6]. Da questo modulo di calcolo del modello si può quindi estrarre il valore della pendenza del terreno nella direzione di scorrimento e supporre che un certo elemento di griglia sia potenzialmente soggetto a fenomeni franosi quando la sua pendenza superi una certa soglia. Il valore numerico di questa soglia può essere ragionevolmente assunto a circa 10 gradi, e comunque può essere meglio calibrato se si hanno maggiori dati su eventi effettivamente accaduti.

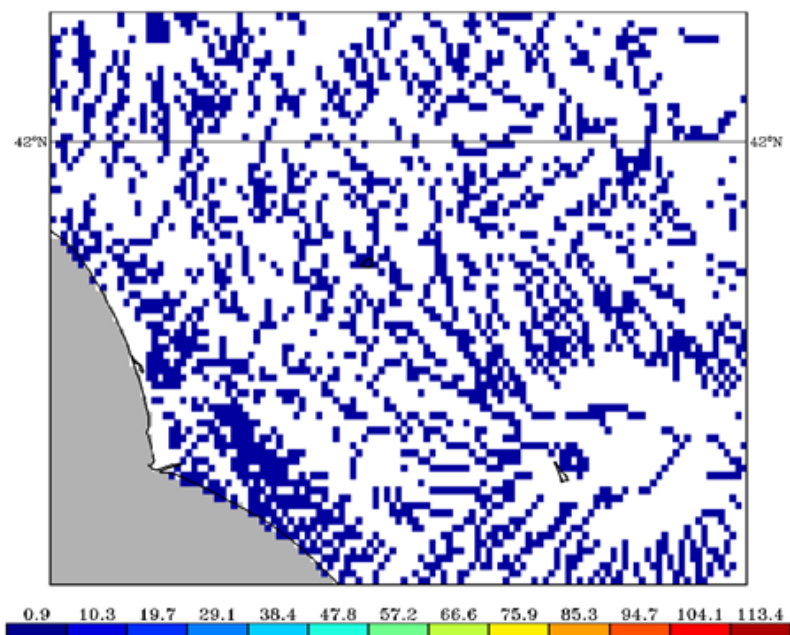
Infine occorre considerare la natura del terreno dal punto di vista geologico e, per riempire il nostro modello predittivo di questo ulteriore layer di informazioni ci siamo serviti delle mappe di pericolosità per frane prodotta dal Ministero dell'Ambiente nell'ambito del PAI (Piani Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico); questi dati contengono, alla risoluzione orizzontale di un chilometro, degli indici di pericolosità che vanno da 0 (pericolosità nulla) a 4 (molto elevata). Analoghe informazioni possono essere desunte anche dalla mappa della suscettibilità alle colate rapide, anche questa caratterizzata da indici nel range 0-4 con identico significato. Sia i codici PAI che quelli di suscettibilità alle colate hanno risoluzioni compatibili con quella utilizzata del modello CHyM, pertanto entrambi i parametri possono essere acquisiti sulla stessa griglia.

Incrociando infine tutte queste informazioni possiamo stabilire un algoritmo generale che predica la possibilità di eventi franosi nei punti di griglia in cui si verificano simultaneamente le seguenti condizioni:

- L'acclività del punto di griglia è maggiore di 0.1 (ci riferiamo al seno trigonometrico dell'angolo nella direzione di scorrimento, ovvero quello di massima pendenza);
- L'area drenata dal punto è inferiore a 10 km², quindi il ruscellamento avviene sulla superficie e non lungo un canale di drenaggio;
- L'indice CAI calcolato dalla predizione operativa è maggiore di 60 mm/ora; il valore numerico di questa soglia è stata ampiamente discusso e giustificato nelle fasi precedenti di questo progetto;
- L'indice PAI o di suscettibilità alle colate rapide è diverso da zero.

Un esempio sintetico di applicazione dell'algoritmo proposto è mostrato nelle mappe riportate nella Figura 6.

CAI alarm index - 16 Ottobre 2020 h: 23:00



Warning type map

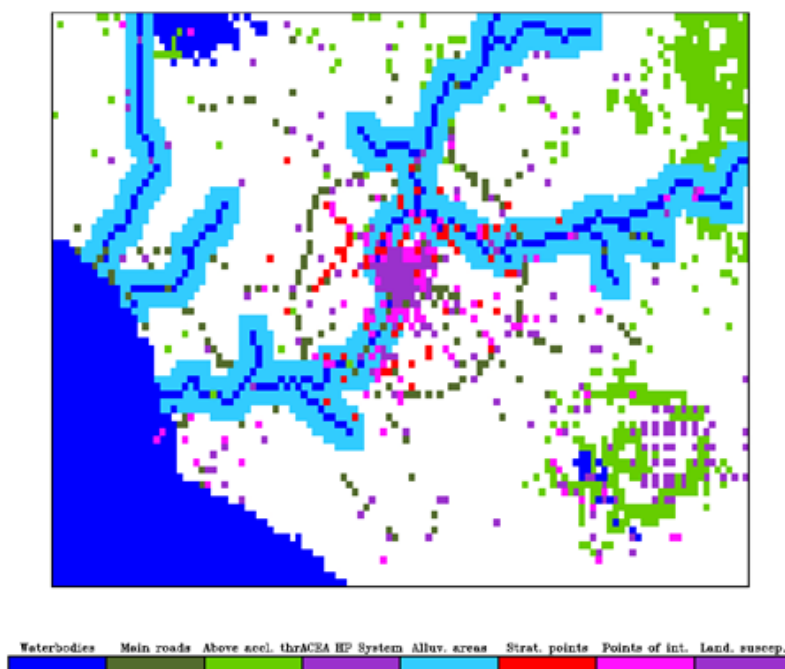


Figura 6. Sintesi dei dati utilizzati per la mappa dei possibili punti interessati da eventi franosi. Nel pannello in alto la mappa dell'indice CAI relativo ai punti con area drenata inferiore a 10 km² dove il ruscellamento avviene in superficie. Questi dati vengono incrociati con i punti, mostrati nel pannello in basso, in cui l'acclività supera il valore di *threshold* (in verde) e dove l'indice PAI è diverso da zero (in rosa).

Nel pannello a destra di Figura 6 viene riportato la mappa dell'indice CAI relativo alle aree dove il ruscellamento avviene in superficie e non nei canali; nel caso specifico l'indice è sempre al di sotto dei valori di allerta, ma si colora di giallo e di rosso nei casi in cui il livello di precipitazione raggiunga valori critici. Nel pannello a destra di Figura 6 la mappa dei punti sensibili è stata integrata con i punti ove l'acclività supera la soglia proposta (area in verde) ed i punti in cui il terreno, per le caratteristiche geologiche della superficie, appare suscettibile ad eventi idrogeologici critici (area in rosa). L'incrocio di questi dati consente di selezionare quei pixel che vanno considerati in fase critica nelle prossime ore.

4 Conclusioni

Gli sviluppi modellistici che sono stati sinteticamente presentati, consentono l'applicazione degli algoritmi sviluppati ad una qualsivoglia realtà urbana e non solo. Uno degli aspetti più importanti dello sviluppo presentato e degli approcci che sono stati proposti, consiste proprio nella estendibilità e nella esportabilità di tutta la catena di allarme proposta.

L'incrocio ad alta risoluzione di tre elementi fondamentali: la simulazione idrologica, le caratteristiche geomorfologiche del territorio e la localizzazione dei punti sensibili (sistemi infrastrutturali elettrico e viario, POI, etc.), consente, in modalità operativa, la predizione di scenari di allarme o di stress che possono facilmente essere utilizzati dalle autorità amministrative, dalle autorità di Protezione Civile e dai responsabili della gestione di servizi essenziali ed infrastrutture critiche (ad esempio, l'operatore elettrico ACEA, ecc.).

In sintesi, in termini di risultati ottenuti, le attività svolte nella presente linea hanno portato allo sviluppo di procedure operative e di carattere generale che possono successivamente essere specializzate per un particolare gestore o utente. Le procedure sono state sviluppate in modo da potersi integrare con la Piattaforma CIPCast-ER (sviluppata da ENEA nell'ambito delle Linee di Attività LA36-38), in termini di condivisione dei dati di base, gestione degli output dei modelli, della visualizzazione degli alert e della interazione con gli utenti finali.

5 Riferimenti bibliografici

1. Colaiuda, C., A. Lombardi, M. Verdecchia, V. Mazzarella, A. Ricchi, et al., Flood Prediction: Operational Hydrological Forecast with the Cetemps Hydrological Model (CHyM). *Int J Environ Sci Nat Res. (2Lombardi,020)*, 24(3), pp. 201-208.
2. 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.
3. 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.
4. Lombardi, A., V. Colaiuda, M. Verdecchia, B. Tomassetti, User-oriented hydrological indices for early warning systems with validation using post-event surveys: flood case studies in the Central Apennine District.
5. 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.
6. Packard, N. H., Wolfram, S., "Two-dimensional cellular automata", 38, *J. Statist. Phys.*, (1985), pp. 901-946.
7. Singh V. P., D. K. Frevert, *Mathematical models of smallwatershed hydrology and application*. Water ResourcePublications, LLC, Highlands Ranch, Colorado, USA, (2002).
8. Taraglio, S., S. Chiesa, L. La Porta, M. Pollino, M. Verdecchia, B. Tomassetti, V. Colaiuda, A. Lombardi, Decision support system for smart urban management: resilience against natural phenomena and aerial environmental assessment, *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management*, **24**, 2019 pp. 135-145.
9. 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.
10. 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.

6 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

PAI - Piani Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico

SRTM - Shuttle Radar Topography Mission

WRF - Weather Research and Forecasting Model, modello meteorologico

7 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.

È 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. È 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.

È coautrice di circa 30 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.