

STIMA DELL'EFFETTO DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI SUI FENOMENI DI DISSESTO GEO-IDROLOGICI: IL CASO STUDIO DELLA CAMPANIA CENTRALE

Guido Rianna^{1*}, Luigi Iodice², Luigi Fariello², Francesco Guarino¹, Paola Mercogliano^{1,3}

¹ Divisione di Ricerca Regional Modeling and geo-Hydrological Impacts, Fondazione CMCC Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici – Capua (Italia).

² Autorità di Bacino della Campania Centrale, Napoli (Italia).

³ Laboratorio di Meteorologia, Centro Italiano Ricerche Aerospaziali (CIRA) – Capua (Italia).

Sommario – La legge italiana 49/2010, recependo la Direttiva Europea 2007/60/CE, richiede che il potenziale effetto dei Cambiamenti Climatici (CC) sui fenomeni di dissesto sia esplicitamente portato in conto nelle tre fasi della pianificazione individuate e nei futuri aggiornamenti. A tal fine, l'Autorità di Bacino della Campania Centrale e la Divisione di Ricerca ReMHI Fondazione CMCC hanno intrapreso una collaborazione i cui maggiori risultati sono riportati nella "Relazione Idrologica" del Piano Stralcio e ampiamente illustrati nel presente contributo. In primo luogo, sono forniti brevi cenni sulle variazioni attese nei valori stagionali di precipitazione e temperatura stimate tramite modelli climatici ad elevata risoluzione; successivamente, sono discusse le attuali prestazioni degli stessi nella stima dei valori estremi di precipitazione subdiaria; infine, sono mostrate le variazioni attese nei valori estremi di precipitazione a breve e lungo termine sotto due differenti scenari di concentrazione e tali risultati sono sovrapposti alle mappe di pericolosità (di frana e piene) attualmente concepite trascurando la variazione nei valori di precipitazione potenzialmente indotta dai CC.

Parole chiave: *cambiamenti climatici, modelli climatici regionali, dissesto idro-geologico, pianificazione territoriale, precipitazione subgiornaliera.*

ASSESSMENT ABOUT THE EFFECT OF CLIMATE CHANGES ON GEO-HYDROLOGICAL PHENOMENA: CENTRAL CAMPANIA CASE STUDY

Abstract – The Italian law 49/2010, implementing the EU Directive 2007/60/CE, requires that potential effect of climate changes (CC) on geo-hydrological hazards must be taken into account for the three established planning stages and their future updates. To this aim, the Basin Authority of Central Campania (BACC) and ReMHI Research Division of CMCC Foundation started a collaboration whose main results are reported in "Hydrological Section" of Geo-hydrological Setting Plan of BACC and widely explained in this contribution. Firstly, brief remarks about future projected variations, on seasonal scale, for cumulative precipitation and mean temperature estimated through high resolution climate models are provided; after, the performances of the adopted climate models in reproducing the extreme values of subdaily precipitation are investigat-

ed; finally, expected changes in subdaily extreme values of precipitation on medium and long time horizon, under two different scenarios are displayed and such results are superimposed to landslide/flood hazard maps currently carried out disregarding the variations in rainfall patterns potentially induced by CC.

Keywords: *climate changes, Regional Climate Models, geo-hydrological impacts, urban development planning, subdaily precipitation.*

Ricevuto il 4-9-2015; Correzioni richieste il 10-12-2015; Accettazione finale il 17-12-2015.

1. INTRODUZIONE

Sulla base di numerose osservazioni e accreditati studi scientifici, l'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2013) ha giudicato come "virtualmente certo" che vi sia in atto un processo di riscaldamento a scala globale e come "estremamente probabile" che almeno la metà dell'aumento della temperatura registrato, negli ultimi 60 anni, sia adducibile ad attività antropiche tramite emissioni di gas serra, aerosol e cambiamenti nell'uso dei suoli.

La grande variabilità spaziale del clima rende più complessa la declinazione a scala regionale (continentale) di tale incremento; per l'Europa, ad esempio, l'aumento registrato nell'ultimo secolo è circa 1,3°C (EEA, 2012), mentre il corrispondente tasso di crescita in Italia è di poco superiore a 1,4°C/secolo (Castellari et al., 2014) con una brusca impennata negli ultimi decenni (0,38°C/decennio per 1981-2011 con gli ultimi 27 anni, con eccezione del 1991, in media più caldi rispetto al valore stimato sul trentennio di riferimento 1961-1990; fonte: ISAC-CNR).

Al di là naturalmente degli impatti direttamente associati a tale variazione come ad esempio l'incremento delle ondate di calore, l'aumento di temperatura si assume possa indurre una marcata intensificazione del ciclo idrologico: oltre, infatti, all'inevitabile crescita della domanda evaporativa atmosferica, esso potrebbe comportare un incremento della ca-

* Per contatti: Via Maiorise s.n.c., 81043 – Capua (CE).
Tel. 08.23623189. E-mail: guido.rianna@cmcc.it.

pacità di ritenzione atmosferica e conseguente variazione dei pattern di precipitazione, con una riduzione del numero di eventi di pioggia ma maggiore probabilità di occorrenza di eventi intensi (Allen e Ingram, 2002, Allan e Soden, 2008; Giorgi et al., 2011). Le analisi condotte per numerose serie osservate di precipitazioni sul territorio italiano (Brunetti et al., 2004; Brunetti et al., 2006) mostrano, seppur con valori e livelli di significatività differenti a seconda dell'area, come tali tendenze siano già correntemente ravvisabili.

In contesti fortemente antropizzati come l'Europa nella quale inoltre sono previsti ulteriori profonde variazioni di uso del suolo e processi di urbanizzazione, l'incremento atteso in intensità e magnitudo delle precipitazioni intense indotte dai Cambiamenti Climatici (CC) potrebbe tradursi in un sostanziale aumento del rischio e quindi dei costi associati ai fenomeni di dissesto geo-idrologico ("high confidence" IPCC, 2013).

A titolo di esempio, si consideri che, per la sola Italia, il tender del Directorate General for Environment (DGE) della Commissione Europea, ClimWatAdapt (www.climwatadapt.eu) stima al 2050, per i soli fenomeni di esondazione fluviale, un potenziale danno atteso pari a circa 1,6 miliardi di Euro – con una componente di incremento pari ai 600 milioni di euro – direttamente imputabile ai CC stimati; analogamente, su un orizzonte temporale più prossimo (2030), lo studio condotto da Dara e Climate Vulnerable Forum (daraint.org), sulla base delle stime fornite da Munich-Re e Emergency Events Database (EM-DAT), assume che l'incremento dei costi associati ai vari fenomeni di dissesto, dovuto alla variazione delle sole forzanti climatiche, possa arrivare a superare il 300%.

Data, quindi, l'entità dei costi stimati connessi alla mancata adozione di misure di adattamento adeguate, nonostante all'oggi permangano significative incertezze associate alla stima delle variazioni attese nelle forzanti climatiche per effetto dei CC e del loro effetto in termini di variazione del rischio geo-idrologico, negli ultimi anni, tutti gli strumenti strategici o di indirizzo messi a punto sia a livello continentale (EC, 2007; EC, 2009; EC, 2013) che a livello nazionale (Castellari et al., 2014) hanno diffusamente affrontato e dibattuto il ruolo dei CC sulla potenziale variazione dell' hazard geo-idrologico stimando le attuali criticità e, al contempo, tentando di individuare le misure di adattamento più efficaci.

Parallelamente, dal punto di vista legislativo, la Direttiva Europea 2007/60/CE ("Direttiva Alluvioni")

impone espressamente, per la prima volta, di tener conto dei potenziali effetti dei CC sulle forzanti climatiche nella redazione delle mappe di pericolosità e rischio e del successivo Piano di Gestione del rischio. Il Decreto Legislativo 49/2010, che recepisce in Italia la Direttiva Alluvioni, si inserisce in un quadro legislativo nazionale consolidato già dal 1998. Il Decreto stabilisce che, relativamente alla valutazione dell'effetto dei CC, essa diventi obbligatoria soltanto per i successivi riesami dei dispositivi (2018-2021 – secondo ciclo e successivamente ogni 6 anni) permettendo che, nella prima fase (la cui chiusura era prevista per il dicembre 2015), possa essere opzionale o limitarsi ad analisi di tipo qualitativo; in particolare, tale differimento ha lo scopo da un lato di consolidare gli attuali progressi scientifici nell'accoppiamento tra modelli climatici e di impatto e dall'altro di giungere a modalità concordate e condivise con cui l'effetto dei CC debba essere portato in conto nella stima dei fenomeni di dissesto (Ministero dell'Ambiente della Tutela del Territorio e del Mare, 2013).

Al fine di avviare, quindi, l'auspicato necessario processo di condivisione delle conoscenze, l'Autorità di Bacino della Campania Centrale e la divisione REMHI (REgional Models and geo-Hydrological Impacts) della Fondazione CMCC hanno firmato, nel 2013, un protocollo d'intesa "prevedendo forme congiunte di collaborazione non onerosa relativamente all'impatto dei cambiamenti climatici sugli atti di pianificazione con particolare riguardo alle portate idrologiche, alla definizione del bilancio idrico, alla definizione delle portate di magra ai fini del Deflusso Minimo Vitale (DMV)". I primi risultati di tale collaborazioni sono quindi riportati nella "Relazione Idrologica" del Piano Stralcio di Assetto Idrogeologico (RI-PSAI) oggi approvato e illustrati, dettagliatamente, nel presente contributo.

Dopo un inquadramento generale del territorio dell'Autorità di Bacino (paragrafo 2.1) e delle finalità del Piano Stralcio (paragrafo 2.2), è presentata brevemente la catena di simulazione climatica utilizzata (paragrafo 2.3) per la stima delle variazioni dei valori di precipitazione e temperatura, medi ed estremi, sull'area di interesse; infine, tramite il confronto tra le mappe di anomalia di precipitazione così stimate e quelle di pericolosità, messe a punto nell'ambito del Piano si tenta, almeno qualitativamente, di stimare, a breve e lungo termine, le aree nelle quali l'usuale stima svolta in condizioni climatiche "stazionarie" possa rivelarsi meno cautelativa (paragrafo 3.1).

2. INQUADRAMENTO TERRITORIALE E METODO DI ANALISI

2.1. Territorio di competenza dell'Autorità di Bacino Regionale della Campania Centrale e reticolo idrografico

Il territorio di competenza dell'Autorità di Bacino (AdB) si estende su di una vasta area della Regione Campania che comprende gli ambiti delle ex AdB Regionale Nord Occidentale della Campania e AdB Regionale del fiume Sele; esso si estende su un'area di circa 2200 kmq, tra le province di Napoli, Avellino, Benevento, Caserta, Salerno, includendo complessivamente 183 comuni – dei quali 91 appartenenti alla Provincia di Napoli, 20 alla Provincia di Salerno, 24 alla Provincia di Avellino, 8 alla Provincia di Benevento, 40 alla Provincia di Caserta. L'area include i versanti del Somma-Vesuvio (nord-ovest), la Penisola Sorrentina (sud-ovest), i Monti Lattari verso est, i Monti Picentini, i Monti di Solofra, i Monti di Sarno (nord-est), comprendendo la piana del fiume Sarno (agro sarnese nocerino) e dei torrenti Solofrana, Cavaiola e Vesuviani, ad ovest. La sua costa nord, comprende il litorale domitio fino al confine con il Bacino Nazionale dei fiumi Liri-Garigliano e Volturno e la relativa area di competenza si protende verso est nell'area casertana; include anche parte del nolano, fino alle falde settentrionali del Vesuvio, mentre a nord comprende le aree prossime al tratto terminale del fiume Volturno; a sud-ovest si sviluppano i bacini dei Regi Lagni, del Lago Patria e quello dell'alveo dei Camaldoli. A sud, fino al mare, il territorio comprende l'area vulcanica dei Campi Flegrei che si affaccia sul golfo di Pozzuoli e le isole di Procida e di Ischia. Nella zona orientale ricadono il bacino dei Regi Lagni, i torrenti vesuviani e la piana di Volturno; in quest'ultima insiste la valle del fiume Sebeto, originariamente paludosa e trasformata, in seguito ad interventi antropici di bonifica, in zona agricola fertile.

Tra i bacini della Campania, quello della Campania Centrale è caratterizzato dal più alto indice di urbanizzazione (densità abitativa e presenza di attività produttive/territorio). Gli aspetti fisico-morfologici del territorio suddetto, sono all'origine della sua elevata vulnerabilità idrogeologica, sismica e vulcanica. L'attuale assetto insediativo è il risultato di processi di trasformazione che hanno determinato, nel corso degli anni, rilevanti modificazioni territoriali ed alterato gli equilibri ecologici. La struttura insediativa mostra una condi-

zione di crescita urbana e demografica disomogenea, con la presenza di aree tradizionalmente forti ed aree storicamente marginali. L'articolata caratterizzazione del territorio dà luogo ad ambiti diversificati per struttura insediativa, assetto fisico-territoriale, connotazioni ambientali – ambiti caratterizzati da una elevata pressione antropica e da fenomeni di forte urbanizzazione, segnati da un continuum urbano con forte commistione tra insediamenti produttivi e residenziali, aree di elevato valore storico-paesistico e naturalistico-ambientale, aree con forte caratterizzazione di tipo agricolo-industriale, aree marginalizzate con presenza di fattori di degrado.

Il territorio dell'AdB si colloca in un contesto ambientale di rilevanza centrale per le valenze paesaggistico-ambientali e storico-culturali, in cui emergono le numerose preesistenze e segni della stratificazione storico-archeologica e dell'identità dei luoghi. In particolare in essa si distinguono:

- ambiti di rilevanza paesaggistico-ambientale (Parchi e aree protette);
- ambiti di rilevanza storico-archeologica (aree archeologiche di Pompei, Ercolano, ecc.);
- elementi di valore storico-culturale (beni storico-architettonici).

Parte del territorio è interessato dal Piano Territoriale Paesistico (PTP) dei Comuni Vesuviani e vigono inoltre il vincolo paesaggistico-ambientale di cui al D.Lgs. n. 42/2004 ed il Piano Urbanistico Territoriale dell'Area Sorrentino Amalfitana.

La rilevante consistenza dei beni ed, in particolar modo, quelli ricompresi all'interno del sistema fluviale e/o in prossimità di fasce di pertinenza fluviale, pone ancor più l'attenzione sulle questioni connesse alla vulnerabilità del territorio e delle necessarie misure di intervento. Nella Fig. 1 si riporta il territorio di competenza con l'indicazione del



Figura 1 – Il territorio dell'AdB Campania Centrale

perimetro dei comuni afferenti. La “lettura” del territorio, svolta attraverso l’assetto originario dell’area, evidenzia le profonde trasformazioni avvenute in questo ambito; in questo contesto, il rapporto tra i sistemi acque-territorio ha fortemente caratterizzato l’intero ambito. Il sistema acque, quale dominante ambientale, ha inciso fortemente sull’identità dei luoghi ed ha favorito lo sviluppo di attività produttive legate a tale elemento a cui si legano la nascita di insediamenti abitativi e la diffusione di molteplici altre attività sorte in relazione alla originaria ampia disponibilità della risorsa idrica ed alla particolare morfologia del territorio. Nel corso degli anni, la modifica del rapporto uso/consumo della risorsa idrica ha determinato la progressiva perdita delle connotazioni originarie, con implicazioni sull’equilibrio ambientale e sull’assetto complessivo del bacino. Il recupero del sistema acque-territorio rappresenta un elemento centrale nelle politiche di intervento finalizzate alla tutela, protezione e valorizzazione delle risorse presenti nel quadro di un Piano complessivo di difesa dal rischio alluvioni. Il reticolo idrografico del territorio di competenza dell’AdB Campania Centrale si articola in due sistemi di drenaggio principali, entrambi attestati sui versanti carbonatici dell’arco preappenninico campano che colleghino le acque “alte” attraverso la Piana campana fino in mare. Il primo si imposta sull’asta artificiale dei Regi Lagni e drena un bacino di circa 1400 kmq, con recapito ultimo sul litorale domitio a sud della foce del Volturno; il secondo, impostato sull’asta, anch’essa prevalentemente artificiale, del sistema Sarno-Solofrano, drena un bacino di circa 400 kmq ed ha il suo recapito ultimo nel Golfo di Castellammare. Al bacino dei Regi Lagni pervengono anche parte delle acque provenienti dal versante settentrionale del Monte Somma, nonché quelle meteoriche intercettate dalle reti di drenaggio urbano a servizio dell’agro nolano ed aversano; al bacino del fiume Sarno giungono anche quelle indirettamente provenienti dal versante meridionale ed orientale del Vesuvio e le acque meteoriche intercettate dalle reti di drenaggio urbano a servizio dell’agro nocerino, sarnese ed agerolese-stabiese. Completano il sistema drenante del territorio, le incisioni minori della Penisola Sorrentina, dell’Isola di Capri, dell’Isola d’Ischia e del versante occidentale del Vesuvio ed i bacini dell’alveo Camaldoli, del Lago Patria, e di Volla. Fanno, infine, parte delle acque interne anche il sistema dei laghi flegrei: Fusaro, Miseno, Lucrino e d’Averno.

2.2. Il Piano Stralcio

Il Piano Stralcio per l’Assetto Idrogeologico dell’AdB Campania Centrale (PSAI) rappresenta lo strumento conoscitivo, normativo e tecnico-operativo attraverso il quale l’Autorità di Bacino attua la pianificazione per le componenti suolo ed acqua; nello specifico, esso contiene la pericolosità da frana e idraulica, quest’ultima in coerenza con le pericolosità di alluvioni di cui al D.Lgs. 49/2010. Il PSAI è, attualmente, uno strumento che basa la pianificazione idraulica su scenari relativi a periodi di ritorno ($T = 20$, $T = 100$ e $T = 300$ anni) statici ovvero indipendenti da effetti che ne possano modificare la significatività o la variabilità. La sfida di inserire, negli scenari di pericolosità idraulica, anche gli eventuali effetti dei cambiamenti climatici, può essere affrontata solo con la compresenza di Enti che (come il CMCC) da anni operano sulla tematica dei cambiamenti climatici affrontando la problematica in ambiti ben più ampi di quelli dei territori di competenza delle AdB.

2.3. Catena di simulazione

Le catene di simulazioni correntemente adottate per la stima futura di tendenze e impatti a scala regionale sono usualmente composte da tre elementi. (1) Sulla base dei risultati di modelli sullo sviluppo socio-economico futuro a scala globale e regionale (Integrated Assessment Models IAMs), si derivano scenari sull’andamento di emissioni e concentrazioni di gas serra (GHG), aerosol, gas chimicamente attivi e variazioni di uso del suolo al 2100; tra i molti disponibili, l’IPCC ne ha selezionati quattro (comunemente conosciuti come RCP Representative Concentration Pathways) al fine di poter disporre di scenari standard che permettano la comparazione dei risultati tra proiezioni. Di questi, lo scenario RCP2.6 prevede riduzioni sostanziali delle emissioni entro pochi decenni; gli scenari RCP4.5 e RCP6.0 sono scenari intermedi o di stabilizzazione delle emissioni mentre lo scenario RCP8.5 prevede un incremento costante delle emissioni fino al 2100; il suffisso numerico rappresenta essenzialmente l’incremento del forcing radiativo stimato al 2100 rispetto all’era preindustriale (1750) in funzione delle concentrazioni e variazioni ipotizzate; al 2111, tale valore è circa pari a $2,29 \text{ W/m}^2$. (2) Le stime così ottenute sono utilizzate come forzanti per i modelli climatici globali (GCM) che permettono la rappresentazione dei principali processi atmosferici a scala planetaria; numerosi studi (Breugem 2007; IPCC, 2013) hanno

mostrato come essi siano in grado di riprodurre il clima globale e la risposta alla variazione di GHG con affidabilità maggiori per alcune variabili (temperatura) ed inferiore per altre; d'altronde, nonostante i notevoli sviluppi degli ultimi anni, le risoluzioni orizzontali, attualmente limitate dagli elevati oneri computazionali, si attestano nell'ordine del centinaio di chilometri; a causa di tale vincolo, tali modelli sono quindi inadeguati per stime di tendenze e impatti a scala locale/regionale per le quali assumono importanza cruciale (anche rispetto alla circolazione di larga scala) le caratteristiche geografiche del territorio (distanza dal mare, orografia). (3) Per tali motivi, sono state quindi sviluppate diverse tecniche di "regionalizzazione" differenti per approccio, oneri computazionali, prerequisiti e limiti; fondamentalmente si riconoscono metodi di regionalizzazione "statistica" e "dinamica". I primi adottano schemi empirici sulla base di relazioni statistiche tra "predittori" a larga scala e variabili climatiche locali, calibrate e validate su dati osservati e successivamente applicate alle variabili dei GCM; richiedono limitato onere computazionale e permettono analisi anche alla scala del punto stazione ma necessitano di lunghe serie di dati osservati per la definizione delle relazioni statistiche. I secondi prevedono l'uso di modelli climatici ad area limitata e a maggiore risoluzione (Regional Climate Model, RCM) innestati per l'area di interesse sul modello globale dal quale traggono le condizioni al contorno; le risoluzioni all'oggi correntemente adottate, nell'ordine dei 10 km, permettono da un lato una migliore risoluzione dell'orografia e dall'altro di considerare una frazione cospicua dei fenomeni atmosferici locali; d'altra parte, anche col loro utilizzo permangono sovente errori (anche in tal caso maggiori per le precipitazioni che per le temperature) che ne possono parzialmente inficiare la loro adozione per stime quantitative degli effetti locali indotti dai CC; d'altronde, sotto l'ipotesi che, per variazioni contenute del sistema climatico, tali errori siano indipendenti dal periodo investigato (errori di natura sistematica o invarianza dell'errore) (Christensen e Christensen, 2007; Maurer et al., 2013), essi possono essere rimossi ricorrendo al confronto tra clima di scenario e corrente o, negli studi di maggiore dettaglio, tramite tecniche di correzione statistica di differente complessità (tecniche di "bias correction").

Nello specifico, la catena di simulazione utilizzata in tale lavoro adotta come GCM, il modello CMCC_CM (Scoccimarro et al., 2011) mentre il modello regionale è COSMO_CLM con risoluzione orizzontale di circa 8 km nella configurazione

ottimizzata da Bucchignani et al. (2015) sull'intero dominio italiano. Le analisi coprono l'intervallo temporale dal 1971 al 2100; per un primo periodo 1971-2005, i modelli climatici sono forzati tramite osservazioni delle emissioni (20CM) mentre per il restante sono utilizzati gli scenari RCP 4.5 e RCP8.5.

La validazione sul dominio italiano per il periodo di controllo mostra come le prestazioni di tali simulazioni, in termini di valori medi per precipitazioni e temperature, siano del tutto in linea con quelle degli altri modelli SOTA (Bucchignani et al., 2015), mentre l'elevata risoluzione orizzontale permette, in molti casi, una migliore riproduzione dei valori estremi (Zollo et al., 2015).

3. RISULTATI E DISCUSSIONE

3.1. Proiezioni di cambiamento climatico per il territorio dell'Autorità di Bacino della Campania Centrale

Le variazioni attese, a scala stagionale, nei valori medi di temperatura e precipitazione sul territorio della Campania Centrale sono rispettivamente mostrate in Tab. 1 e Fig. 2. A tal fine, si assume, per un'adeguata valutazione delle proprietà statistiche del sistema climatico, un periodo di riferimento di trenta anni (World Meteorological Organization, WMO): il periodo corrente adottato è 1971-2000 mentre, sul futuro, si analizzano due orizzonti temporali: 2021-2050 come indicativo di dinamiche sul breve periodo e 2071-2100 sul lungo periodo. Per quanto riguarda la temperatura, dal confronto tra periodo futuro e corrente è stimato un aumento generalizzato in tutte le stagioni e per entrambi gli scenari; inoltre, l'intensità dell'incremento risulta funzione crescente dell'orizzonte temporale e della severità dello scenario di concentrazione ipotizzato;

Tabella 1 – Variazione attesa (in °C) del valore medio areale della temperatura stagionale nel dominio dell'Autorità di Bacino della Campania Centrale per i due scenari di concentrazione tra i due periodi di riferimento futuri (2021-2050 e 2071-2100) e il periodo di controllo 1971-2000

	DJF	MAM	JJA	SON
RCP4.5 2021-2050	1,4	1,5	1,8	1,8
RCP8.5 2021-2050	2,1	1,8	1,9	2,1
RCP4.5 2071-2100	2,8	2,9	3,5	3,5
RCP8.5 2071-2100	5,1	4,7	6,3	5,4

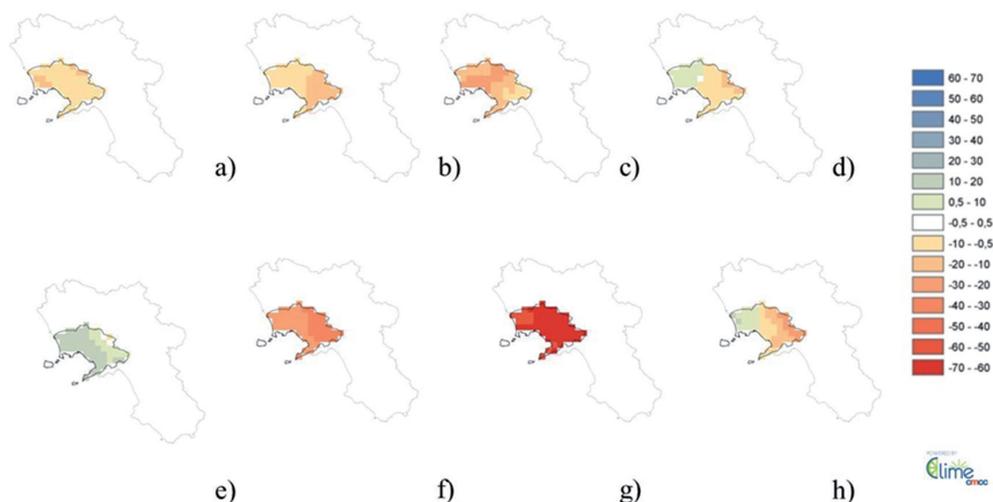


Figura 2 – Anomalia (in %) stimata tramite simulazione climatica della precipitazione cumulata stagionale sotto lo scenario di concentrazione RCP 8.5 per gli intervalli 2021-2050: DJF (a), MAM (b), JJA (c), SON (d) e 2071-2100: DJF (e), MAM (f), JJA (g), SON (h) rispetto all'intervallo di riferimento 1971-2000

già sul breve periodo, le stime sono in media poco al di sotto del valore di 2°C con valori di poco superiori nella stagione umida sotto lo scenario RCP8.5; per il periodo 2071-2100, invece, le proiezioni sotto i due scenari divergono significativamente: l'incremento si attesta su circa 3°C nello scenario di stabilizzazione mentre è oltre i 5°C in media (6,3°C nella stagione estiva) per lo scenario più estremo. All'incremento generalizzato dei valori di temperatura, si contrappongono variazioni attese di segno contrastante per la precipitazione stagionale. In Fig. 2, si riportano le anomalie percentuali per lo scenario RCP8.5 (le equivalenti sotto lo scenario RCP4.5, mostrate nella RI-PSAI, confermano tali tendenze seppur con inferiore intensità). In tali elaborazioni, si considerano solo i punti griglia ricadenti interamente nel dominio di interesse evitando ogni tipo di interpolazione sul dato di output (tutte le elaborazioni grafiche sono state effettuate tramite il software CLIME sviluppato dalla divisione REMHI del CMCC; Cattaneo et al., 2014). Sull'intervallo temporale più prossimo, è generalmente prevista una riduzione dei valori di precipitazione con picchi dell'ordine del 30% in estate; soltanto in autunno la proiezione restituisce un differente comportamento per la parte settentrionale del dominio interessata da leggeri incrementi e quella meridionale con riduzioni di uguale intensità. Sull'intervallo temporale 2071-2100, le proiezioni confermano le tendenze precedenti per le stagioni più secche (primavera ed estate) seppur con valori di anomalia sostanzialmente superiori (in estate, le riduzioni attese raggiungono il 70%); in autunno, si conferma un comportamento differente sulle due

aree con un ulteriore decremento dei valori meridionali. Al contrario, nella stagione invernale, le leggere riduzioni (inferiori al 10%) sul lungo periodo si invertono con incrementi stimati dell'ordine del 20%. Il risultato integrale, in termini generali, è una tendenza sull'area ad una "estremizzazione" dei comportamenti stagionali con parte dell'anno caratterizzata da alte temperature e scassissime precipitazioni (con conseguente maggiore probabilità di occorrenza di fenomeni siccitosi e ondate di calore) e altra parte caratterizzata da incrementi di temperatura inferiori e stazionarietà o incrementi dei cumuli di precipitazione.

Le variazioni attese nei valori medi, pur permettendo un inquadramento generale delle dinamiche atmosferiche potenzialmente indotte dai CC, sono però in grado di restituire solo informazioni limitate in merito alla variazione dell'hazard idro-geologico sull'area; per quanto riguarda i fenomeni di piena, infatti, per la morfologia del territorio, il tempo di corrivazione dei bacini è raramente superiore alle 6 ore (RI-PSAI, 2014); d'altro canto, sull'area, i fenomeni di frana interessano principalmente le coltri piroclastiche risultato delle eruzioni dei complessi vulcanici del Somma-Vesuvio e dei Campi Flegrei; seppur con marcate variazioni in funzione dell'acclività del pendio e della posizione degli stessi rispetto ai centri eruttivi (che ne determina essenzialmente la serie di eruzioni dal quale sono stati raggiunti), numerose ricerche (Pagano et al., 2010; Frattini et al., 2004; Rianna et al., 2014) hanno mostrato come l'innesco dei fenomeni di frana in tali coltri sia spesso contestuale ad un intenso evento di precipitazione su scala

di 1-2 giorni seppur agente in sinergia con un periodo di precipitazioni antecedenti la cui durata è funzione di caratteristiche morfologiche locali; a questi, inoltre, si aggiungono fenomeni di flusso iperconcentrato che interessano usualmente le coltri piroclastiche presenti su pendii fortemente acclivi e per i quali l'innesco è spesso associato a fenomeni di precipitazione intensa su scala sub-diaria.

In virtù di quanto detto, è quindi chiaro come la stima delle variazioni di pericolosità geo-idrologica potenzialmente indotte dai CC sull'area sia strettamente correlata soprattutto ai cambiamenti attesi nei valori estremi di precipitazione intensa alla scala giornaliera e sub-giornaliera.

Purtroppo, come riportato in numerosi studi (Maraun et al., 2010; Fowler et al., 2007; Maurer et al., 2013), su tali scale temporali (soprattutto per i valori estremi), a causa delle risoluzioni oggi permesse e delle conseguenti parametrizzazioni fisiche adottate, i risultati delle simulazioni climatiche sono caratterizzate da incertezze (ed errori associati) sensibilmente superiori a quelli restituiti fino alla scala giornaliera limitandone in molti casi l'utilizzo; d'altro canto, è bene ricordare che, per tali scale temporali, spesso scarseggiano anche le serie di dati di adeguata lunghezza e densità spaziale per una congrua validazione delle prestazioni dei modelli climatici.

Sul territorio in esame, il confronto, sul periodo di riferimento 1971-2000 in termini di media spaziale, tra i valori massimi annuali estratti dalla simulazione per le tre durate di riferimento 6, 12 e 24 ore (6 ore è la risoluzione temporale minima a disposizione per la simulazione climatica) e i corri-

spettivi valori riportati negli Annali Idrologici [Tabella III] restituisce una sottostima significativa, poco inferiore al 40% per i massimi a 6 ore e leggermente superiore al 30% per i dati a 12 e 24 ore; tuttavia, se si reitera l'analisi, in modo puntuale, sulle sole serie per cui siano disponibili almeno 20 anni di osservazioni l'errore, comunque consistente, è inferiore al 34% per il dato a 6 ore e tra il 25 e il 29% per i dati a 12 e 24 ore.

Valutata l'entità dell'errore, successive analisi mirano a comprendere se tale errore possa essere assunto come relativamente invariante nel tempo e se, al netto dell'errore sulla stima media, la simulazione sia almeno in grado di identificare variazioni spaziali sull'area. Per quanto riguarda il primo punto, dividendo il periodo di riferimento 1971-2000, in due sotto intervalli secondo diverse permutazioni (e.g. 1971-1985 vs 1986-2000; pari vs dispari) e confrontando i relativi errori, si constata come essi non varino oltre il 3% rivelando una sostanziale invarianza rispetto al periodo investigato.

Per quanto riguarda il secondo aspetto, in Fig. 3 si mostra, per i valori di massimo annuale a 24 ore, il confronto tra risultato del modello (a) e osservazione(b); in ambedue i casi, i valori sono riportati come rapporto tra valore locale e valore medio sull'intera area al fine di ridurre, per quanto possibile, l'effetto di errori medi sistematici; valori maggiori di uno quindi individuano aree in cui la media locale dei massimi è superiore al valore massimo medio dell'intero territorio mentre l'opposto accade per valori inferiori all'unità; il modello riesce ad individuare in modo adeguato le variazioni spaziali con valori maggiori della media nell'area interna e

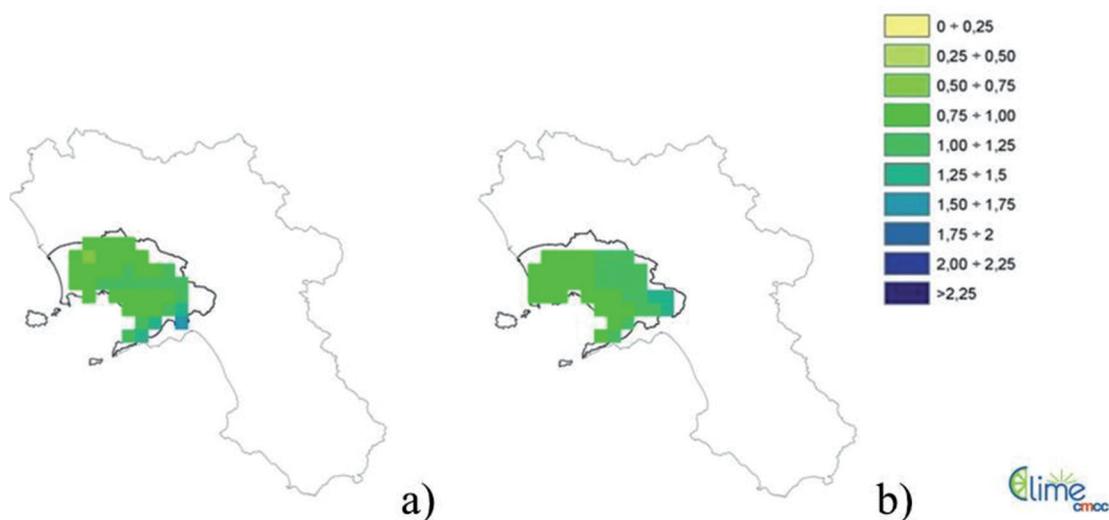


Figura 3 – Confronto dell'anomalia rispetto al valore medio areale, tra i dati osservati (a) e la simulazione climatica CMCC-CM/COSMO-CLM (b) per i dati medi sull'intervallo 1971-2000 di massimo annuale a 24 ore

sud-est e valori inferiori nel resto del dominio; parimenti, anche il campo di variabilità degli scostamenti dalla media è colto in modo adeguato.

Dopo aver chiarito i limiti e le prestazioni della simulazione climatica sugli orizzonti temporali di interesse, sono di seguito mostrati alcuni dei risultati di maggiore interesse in termini di variazione di occorrenza e magnitudo dei fenomeni intensi di precipitazione.

In Fig. 4, su scala stagionale, si riporta la frequenza relativa (in %) delle precipitazioni (superiori a 0,1 mm) a 6 ore mediate spazialmente per il periodo di controllo e il trentennio 2071-2100 sotto ambedue gli scenari di concentrazione; è inoltre riportata la frequenza relativa attesa, per gli stessi intervalli, di assenza di precipitazione (indicata come “proportion dry”). Su tutti gli intervalli, le precipitazioni sono state normalizzate rispetto al valore medio sul periodo di controllo nel tentativo di minimizzare l’effetto degli errori sistematici (Coppola e Giorgi, 2010) mentre l’adozione della scala logaritmica permette di ottenere un livello di dettaglio maggiore per gli eventi intensi caratterizzati da basse frequenze di occorrenza. In tutte le stagioni, è stimato un incremento dei periodi di assenza di pioggia (funzione

della severità dello scenario) che, in parte, è giustificato dalla riduzione attesa dei valori cumulati (Fig. 2) e, in parte, dalla variazione attesa nella frequenza degli eventi di precipitazione con un sostanziale incremento delle code (in spessore e lunghezza) stimato per l’intervallo futuro sotto ambedue gli scenari; la variazione, presente in tutte le stagioni, risulta particolarmente significativa in autunno mentre è piuttosto limitata nella stagione primaverile; coerentemente, per gli eventi meno intensi, entrambi gli scenari restituiscono una riduzione futura nella frequenza relativa degli eventi in parte mascherata dall’adozione dell’asse logaritmico.

In Fig. 5 e 6 sono quindi mostrate le anomalie percentuali stimate nei valori massimi annuali di precipitazione rispettivamente sugli intervalli di 6 e 24 ore (i corrispettivi valori sull’intervallo intermedio di 12 ore sono riportati nelle Relazione Idrologica del Piano Stralcio) per ambedue i periodi e scenari; alcuni elementi appaiono chiaramente discernibili: con limitate eccezioni sull’orizzonte temporale più prossimo, è stimato un sostanziale aumento dei valori massimi di precipitazione; ancora una volta, il segnale climatico appare funzione dell’orizzonte temporale e delle severità dello scenario di concentra-

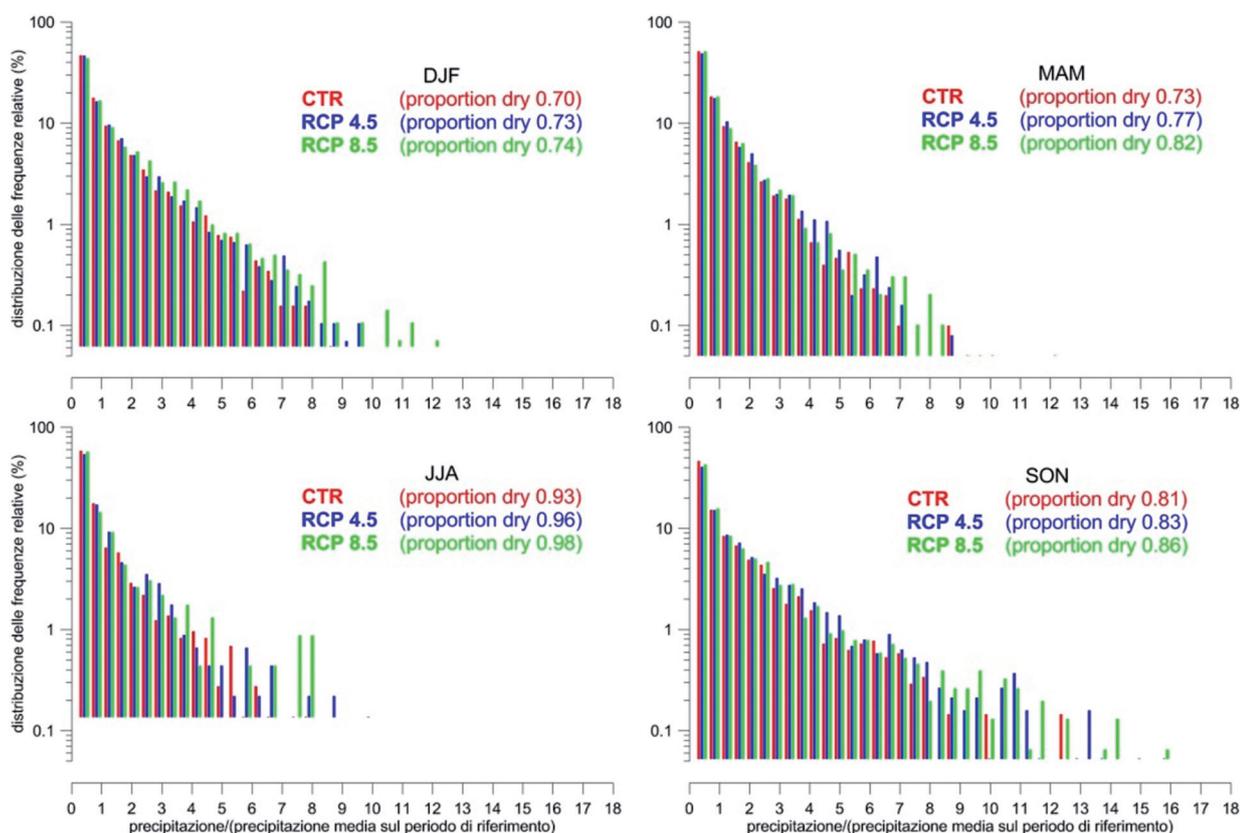


Figura 4 – Distribuzione delle frequenze relative di accadimento per l’intervallo di 6 ore per la sola componente del campione con precipitazione superiore a 0.1mm per periodo di controllo (1971-2000) e trentennio 2071-2100 per le simulazioni climatiche guidate dagli scenari di concentrazione RCP 4.5 e RCP 8.5

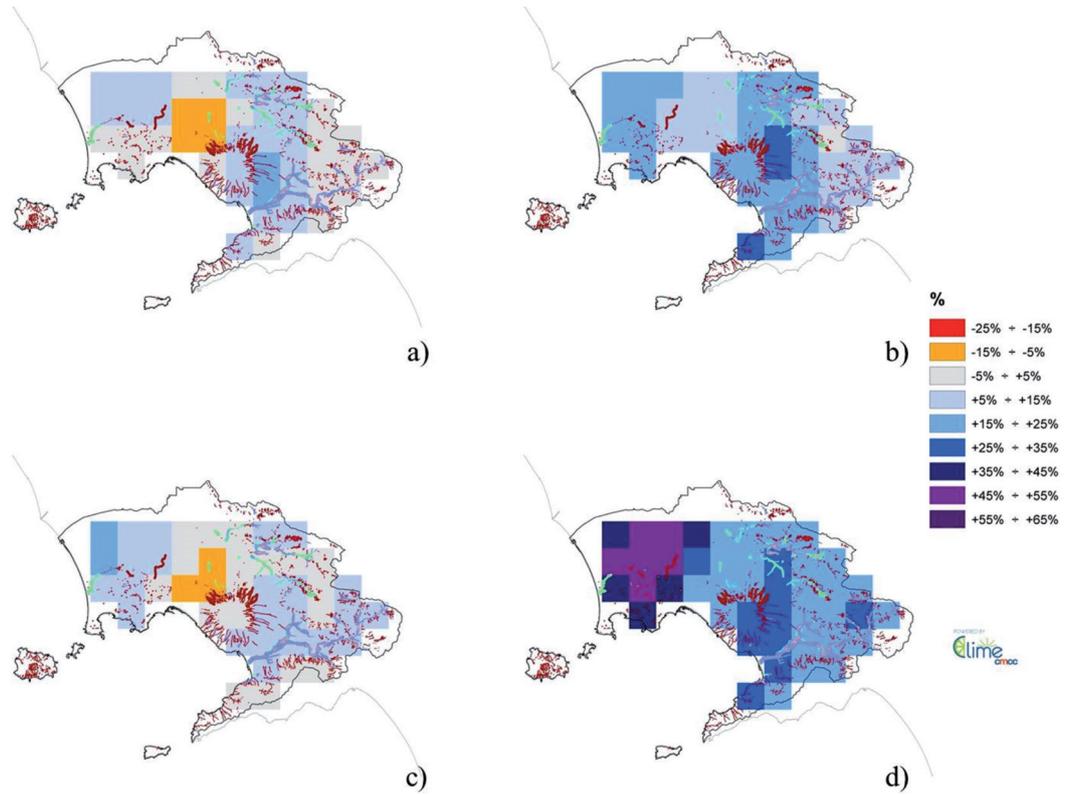


Figura 5 – Sovrapposizione tra: anomalie, in %, nei valori massimi di precipitazione a 6h (a, RCP 4.5 2021-2050; b, RCP4.5 2071-2100; c, RCP8.5, 2021-2050; d, RCP8.5 2071-2100 vs 1971-2000) e mappe di pericolosità idraulica: P1 (verde), P2 (azzurro), P3 (rosa) P3 con specifiche criticità idrauliche (rosso), aree interessate da fenomeni di flusso iperconcentrato (bordeaux)

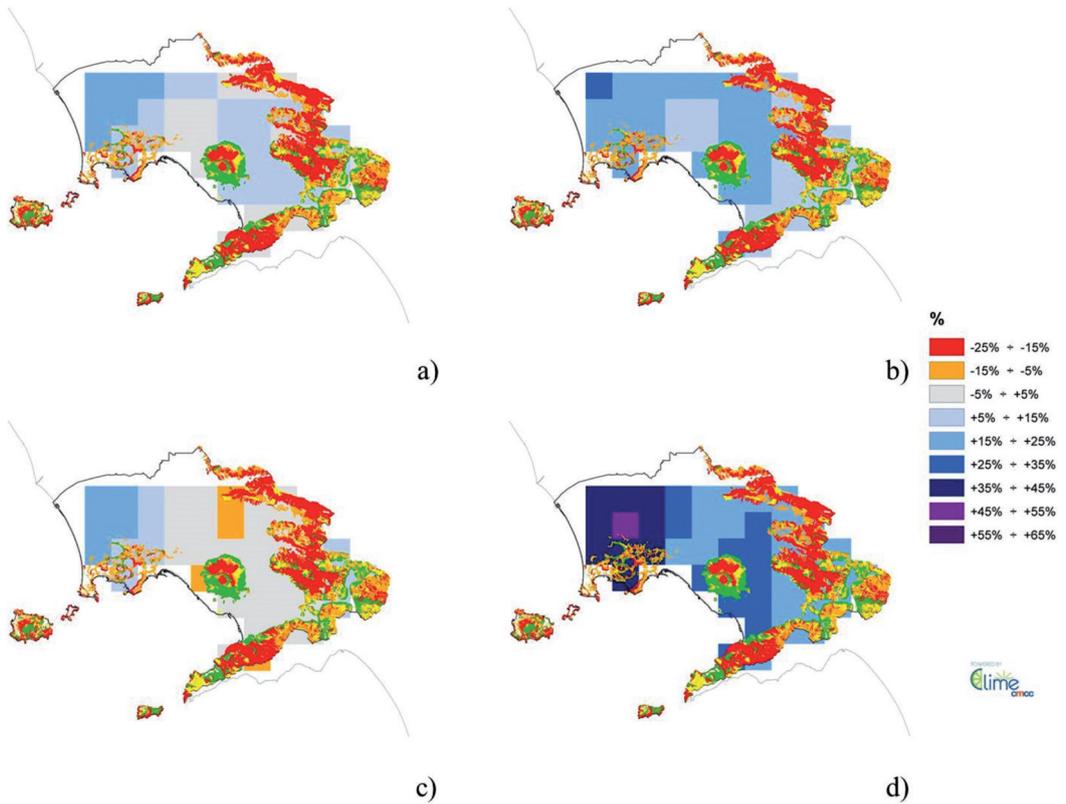


Figura 6 – Sovrapposizione tra: anomalie, in %, nei valori massimi di precipitazione a 24h (a, RCP 4.5 2021-2050; b, RCP4.5 2071-2100; c, RCP8.5, 2021-2050; d, RCP8.5 2071-2100 vs 1971-2000) e mappe di pericolosità da frana: P1 (verde), P2 (giallo), P3 (arancione) P4 (rosso)

zione mentre solo leggere deviazioni sono stimate per i differenti intervalli di riferimento.

Sul breve termine, le aree interessate da variazioni significative (>15%) sono ridotte ed essenzialmente concentrate nelle aree a confine (settentrionale e meridionale) del territorio considerato; in tal caso, anche le differenze tra gli scenari sono poco accentuate; passando alla stima sul lungo termine, invece, in tutto il dominio è stimato un sostanziale incremento dei valori di anomalia associato però a marcate differenze tra i due scenari; d'altra parte, i pattern spaziali di variazione, precedentemente identificati appaiono preservati; per tali motivi, sotto lo scenario RCP4.5, le anomalie massime si attestano a circa il 20% rispetto al periodo di riferimento mentre, per lo scenario RCP 8.5, nell'area settentrionale le variazioni, in media, sono dell'ordine del 40% (con picchi vicini al 60%) rispetto al periodo di riferimento.

Le attuali carenze e le significative incertezze correntemente associate alla modellazione climatica, prima illustrate, permettono di trarre da tali proiezioni, al più, informazioni su direzione e "magnitudo relativa" delle variazioni attese nei valori massimi di precipitazioni; ciò nonostante, può risultare di grande utilità incrociare tali indicazioni con quelle provenienti dalle mappe di pericolosità per fenomeni di dissesto idraulico (Fig. 5) o di frana (Fig. 6); infatti, poiché esse sono usualmente ricavate in ipotesi di "stazionarietà delle forzanti atmosferiche", tale confronto permette di individuare le aree in cui tale assunzione possa rivelarsi meno cautelativa.

Per quanto riguarda i fenomeni di dissesto idraulico, la presenza di bacini di limitate dimensioni e/o spesso caratterizzati da significative percentuali di superficie impermeabilizzata comporta tempi di corrivazione inferiori alle 6 ore per la gran parte del territorio considerato; soltanto in limitate aree dell'alto salernitano e casertano tale soglia è superata con valori che raggiungono rispettivamente le 12 -20 ore.

D'altra parte, come evidenziato in precedenza, la direzione e magnitudo delle anomalie individuate mostrano solo poche variazioni sui vari intervalli di riferimento per cui, per semplicità, in Fig. 5, la sovrapposizione è condotta utilizzando i soli dati sulle 6 ore.

Sul breve periodo (Figg. 5a, 5c), sotto ambedue gli scenari, le potenziali sottostime della pericolosità assumono modesta entità in special modo al confine meridionale per il quale la pressoché invarianza dei valori è stimata; i valori maggiori di anomalia

(all'incirca il 15%) si sovrappongono alle aree dell'alto salernitano dove, al momento, le valutazioni di pericolosità restituiscono fenomeni di livello P2 e P3 la cui frequenza di occorrenza potrebbe registrare quindi un lieve incremento; sul lungo orizzontale temporale (Figg. 5b, 5d), sono invece identificabili tendenze molto più nette: sotto lo scenario RCP4.5, le aree per le quali l'attuale stima di pericolosità potrebbe rivelarsi meno prudente (incrementi dei valori massimi di precipitazione dell'ordine del 25%) sono l'area orientale del territorio vesuviano e la zona settentrionale della costiera; in entrambi i casi si tratta di aree densamente popolate dove l'attuale qualità e quantità dei beni esposti appare elevata. Nel primo caso, attualmente l'area risulta vulnerabile soprattutto a fenomeni di dissesto idraulico (in aree caratterizzate inoltre da significative criticità) mentre nel secondo caso sono soprattutto i fenomeni di flusso iperconcentrato le tipologie di dissesto più diffuse.

Sotto lo scenario RCP8.5, come sottolineato, cresce l'estensione delle aree nelle quali l'incremento atteso dei valori massimi di precipitazione raggiunge valori significativi. In particolare, nell'area centrale del dominio, anomalie dell'ordine del 20% sono stimate non solo sui territori sopra riportati per lo scenario RCP4.5 ma per un'area molto più ampia che dall'interno raggiunge le aree della costiera sorrentina; per tale motivo, alcune delle aree interne attualmente interessate da fenomeni caratterizzati da bassa probabilità di accadimento (P1-P2) potrebbero, per effetto dei cambiamenti climatici, subire un incremento dell'occorrenza degli stessi.

D'altra parte, crescita più elevata dei valori di precipitazione massima è stimata nella porzione settentrionale del territorio (fino al 60%); in essa, l'estensione delle aree soggetta a fenomeni di dissesto idraulico è fortunatamente limitata (seppur caratterizzati da elevata pericolosità).

Per quanto riguarda i fenomeni di frana, infine, la sovrapposizione tra le relative mappe di pericolosità e le anomalie di precipitazione massima è riportata in Fig. 6. In tal caso, in virtù delle dinamiche di innesco sopra trattate, l'intervallo di riferimento considerato è pari a 24 ore.

Per tali tipologie di fenomeni, inoltre, è bene ricordare che sebbene le attuali stime di pericolosità siano condotte sulla base fondamentalmente dei parametri geomorfologici dei versanti (ad esempio spessore delle colture, acclività dei versanti, esposizione), la scelta degli stessi e il relativo peso è funzione della calibrazione e validazione condotta sulla base degli eventi passati; la variazione dei pat-

tern di precipitazione potrebbe perciò rendere vulnerabili anche pendii in passato non interessati da fenomeni franosi.

Sul breve periodo (Figg. 5a, 5c), i valori maggiori di anomalia di precipitazione massima sulle 24 ore interessano essenzialmente aree nelle quali non sono presenti pendii potenzialmente instabili; al contrario, in aree come quella di Sarno, coinvolta nel 1998 in un evento tristemente noto di colata rapida di fango che provocò centinaia di vittime, l'incremento di precipitazione atteso si attesta su valori dell'ordine del 10% solo sotto lo scenario RCP4.5. Anche in tal caso, la situazione muta drasticamente considerando l'orizzonte temporale più lontano (Figg. 6b, 6d). In tal caso, per lo scenario RCP4.5, le aree vesuviane e a nord di Napoli sono interessate da incrementi dell'ordine del 20% mentre, per l'area dei tristemente noti eventi del Maggio 1998, l'incremento continua a mantenersi attorno al 10-15%. Soprattutto per le prime, quindi, caratterizzate da elevata vulnerabilità, tale incremento potrebbe tradursi in una maggiore occorrenza dei fenomeni. Il discorso può parimenti reiterarsi per lo scenario RCP8.5 nel quale, per tutte le aree considerate, l'incremento assume valori ancor più elevati: superiori al 50% nell'area a Nord di Napoli, oltre il 30% nel territorio vesuviano e superiori al 20% per il territorio sarnese.

In tutti i contesti, quindi, l'entità degli incrementi potrebbe comportare l'occorrenza di fenomeni anche in pendii che, all'oggi, in virtù ad esempio degli spessori delle coltri, non sono stati soggetti agli stessi.

4. CONCLUSIONI

La Direttiva Europea 2007/60/CE ed il relativo decreto legislativo di recepimento (D.Lgs. 49/2010) richiedono una esplicita stima degli effetti dei cambiamenti climatici sull'occorrenza e magnitudo dei fenomeni di dissesto idro-geologico.

In tale ottica, al fine di ottenere prodotti attendibili, dovrebbero essere tenute ben presenti le sostanziali incertezze che caratterizzano la modellazione climatica soprattutto per quanto concerne la stima (e quindi le possibili variazioni) dei valori di precipitazione estrema sulle scale temporali di interesse. In tale contesto, la valutazione richiesta dalla normativa può rappresentare un'importante opportunità per incrementare la comprensione e lo scambio di conoscenze tra differenti campi di ricerca (climatologia, idrologia, geologia) e tra questi e la sfera amministrativa; pertanto, la ricerca presenta-

ta può essere considerata uno "step zero" col quale si è cercato di raggiungere fundamentalmente tre obiettivi: i) esporre in modo chiaro le attuali prestazioni dei modelli sulle variabili di interesse; ii) individuare le principali tendenze per il dominio di studio in termini di "direzione" e "magnitudo relativa" delle variazioni attese nella distribuzione dei valori massimi sull'area qualora le emissioni dei gas climalteranti si rivelassero in linea con quanto prospettato dagli scenari di concentrazione; iii) fornire una prima indicazione (con tutte le cautele del caso) circa le aree per le quali, sulla base degli incrementi stimati, l'attuale valutazione di pericolosità condotta in condizioni "stazionarie" possa rivelarsi meno cautelativa.

D'altro canto, in questi anni, la comunità scientifica sta compiendo significativi progressi: l'incremento delle risorse di calcolo permette un sostanziale aumento delle risoluzioni dei modelli climatici e quindi l'adeguata caratterizzazione di fenomeni di importanza cruciale per la modellazione dei fenomeni intensi di precipitazione (Mercogliano et al., 2013). La messa a punto di catene di simulazione nelle quali le competenze sopra citate sono perfettamente integrate permette di produrre, a scala puntuale e/o di bacino, stime credibili della potenziale variazione negli hazard idro-geologici per effetto dei cambiamenti climatici (Comegna et al., 2013; Damiano & Mercogliano, 2013; Vezzoli et al., 2015; Rianna et al., 2014b); infine, nell'ambito di progetti europei di ricerca (ad esempio FP7 INTACT), sono in sviluppo approcci più complessi con i quali, coerentemente con le richieste e le priorità presentate dagli stakeholders, si intende giungere alla valutazione delle variazioni delle condizioni di rischio indotte dai CC, per molteplici impatti, su settori strategici come, ad esempio, le infrastrutture critiche.

5. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Allan R.P. e Soden B.J. (2008) Atmospheric warming and the amplification of precipitation extremes. *Science* vol. 321 (5895):1481-1484.
- Allen M.R. e Ingram W.J. (2002) Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle. *Nature* vol 419: 224-232.
- Autorità di Bacino della Campania Centrale (2014) Relazione Idrologica- Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico.
- Breugem W.P., Hazeleger W. e Haarsma R.J. (2007) Mechanisms of northern tropical Atlantic variability and response to CO₂ doubling. *Journal of Climate* vol 20(11): 2691-2705.
- Brunetti M., Maugeri M., Monti F., e Nanni T. (2004) Changes in daily precipitation frequency and distribution in Italy over the last 120 years. *Journal Geophysical Research* vol 109:D01502.

- Brunetti M., Maugeri M., Monti F., Nanni T. (2006) Temperature and precipitation variability in Italy in the last two centuries from homogenized instrumental time series. *International Journal of Climatology* vol 26:345-381.
- Bucchignani E., Montesarchio M., Zollo A.L., Mercogliano P. (2015) High resolution climate simulations with COSMO-CLM over Italy: performance evaluation and climate projections for the XXI century, *International Journal of Climatology* DOI: 10.1002/joc.4379.
- Castellari S., Venturini S., Ballarin Denti A. et al. (2014) Rapporto sullo stato delle conoscenze scientifiche su impatti, vulnerabilità ed adattamento ai cambiamenti climatici in Italia. Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, Roma, 878 pp.
- Cattaneo L., Rillo V. e Mercogliano P. (2014) Clime: analysing climate data in GIS environment, *Climate Change: Scenarios, impacts and policy in: Proceedings of SISC (Società Italiana per le Scienze del Clima) Second Annual Conference, Venezia, 29-30 Settembre, 434-447.*
- Christensen J.H., Christensen O.B. (2007) A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century. *Climate Change* vol 81:7-30.
- Coppola E. e Giorgi F. (2010) An assessment of temperature and precipitation change projections over Italy from recent global and regional climate model simulations. *International Journal of Climatology* vol 30:11-32.
- Comegna L., Picarelli L., Bucchignani E., Mercogliano P. (2013) Potential effects of incoming climate changes on the behaviour of slow active landslides in clay. *Landslides* vol 10 (4): 373-391.
- Damiano E., Mercogliano P. (2013) Potential effects of climate change on slope stability in unsaturated pyroclastic soils. In: *Landslide Science and Practice* vol 4: 15-25.
- EEA (Agenzia Europea dell'Ambiente) (2012) Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2012. EEA Report no. 12/2012. Disponibile in inglese su EEA: <http://www.eea.europa.eu/publications/climate-impacts-and-vulnerability>.
- EC (Commissione Europea) (2007) Libro Verde della Commissione al Consiglio, al Parlamento Europeo, al Comitato Economico e Sociale Europeo e al Comitato delle Regioni, L'adattamento ai cambiamenti climatici in Europa, Disponibile in italiano.
- EC (Commissione Europea) (2009) Libro Bianco. L'adattamento ai cambiamenti climatici: verso un quadro d'azione europeo. Disponibile in italiano.
- EC (Commissione Europea) (2013) Comunicazione della Commissione al Consiglio, al Parlamento Europeo, al Comitato Economico e Sociale Europeo e al Comitato delle Regioni. Strategia dell'UE di adattamento ai cambiamenti climatici, 2013.
- Fowler H.J., Blenkinsop S. e Tebaldi C. (2007) Linking climate change modelling to impact studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. *International Journal of Climatology* vol 27:1547-1578.
- Fratini P., Crosta G.B., Fusi N. e Dal Negro P. (2004) Shallow landslides in pyroclastic soils: a distributed modelling approach for hazard assessment. *Engineering Geology* vol 73:277-295.
- Giorgi F., Im E.S., Coppola E., Diffenbaugh N.S., Gao X.J., Mariotti L. e Shi Y. (2011) Higher Hydroclimatic Intensity with Global Warming. *Journal of Climate* vol 24:5309-5324.
- IPCC (2007) The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge (United Kingdom) and New York (NY, USA) [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)], Cambridge University Press, 996 pp.
- IPCC (2013) Summary for Policymakers In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge (United Kingdom) and New York (NY, USA), [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)], Cambridge University Press, 29 pp.
- Maraun D., Wetterhall F., Ireson A.M. et al. (2010) Precipitation downscaling under climate change: Recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user, *Rev. Geophys.* vol 48: RG3003.
- Maurer E.P., Das T., Cayan D.R. (2013) Errors in climate model daily precipitation and temperature output: time invariance and implications for bias correction. *Hydrological Earth System Science* vol 17: 2147-2159.
- Ministero dell'Ambiente, della tutela del territorio e del mare, Direzione Generale per la tutela del territorio e delle risorse idriche (2013) Indirizzi operativi per l'attuazione della Direttiva 2007/60/CE relativa alla valutazione ed alla gestione dei rischi da alluvione con riferimento alla predisposizione delle mappe della pericolosità e del rischio di alluvioni (Decreto Legislativo n. 49/2010).
- Mercogliano P., Bucchignani E., Montesarchio M., Zollo A.L. (2013) Very high resolution simulations with COSMO-CLM over Alpine space: benefits versus costs, *International Conference on Regional Climate - CORDEX, Brussels, 4-7 November 2013.*
- Pagano L., Picarelli L., Rianna G., Urciuoli G. (2010) A simple numerical procedure for timely prediction of precipitation-induced landslides in unsaturated pyroclastic soils. *Landslides* vol 7(3): 273-289.
- Rianna G., Pagano L., Urciuoli G. (2014a) Rainfall patterns triggering shallow flowslides in pyroclastic soils. *Engineering Geology* vol 17:22-35.
- Rianna G., Zollo A.L., Tommasi P., et al. (2014b) Evaluation of the effects of climate changes on landslide activity of Orvieto clayey slope. *Procedia Earth and Planetary Science* vol 9:54-63.
- Scoccimarro E., Gualdi S., Bellucci A. et al. (2011) Effects of Tropical Cyclones on Ocean Heat Transport in a High Resolution Coupled General Circulation Model, *Journal of Climate* vol 24: 4368-4384.
- Vezzoli R., Mercogliano P., Pecora S. et al. (2015) Hydrological simulation of Po River (North Italy) discharge under climate change scenarios using the RCM COSMO-CLM. *Science of The Total Environment* vol 521-522:346-358.
- Zollo A.L., Rillo V., Bucchignani E. et al. (2015) Extreme temperature and precipitation events over Italy: assessment of high resolution simulations with COSMO-CLM and future scenarios. *International Journal of Climatology* DOI: 10.1002/joc.4401.

RINGRAZIAMENTI

Gli Autori Rianna e Guarino hanno svolto la ricerca nell'ambito dei progetti di ricerca GEMINA (Ministero dell'Istruzione, Università e Ricerca, MIUR) e FP7 INTACT (n° FP7-SEC-2013-1-606799).



INGEGNERIA DELL'AMBIENTE

per il 2016 è sostenuta da:

