



scienza attiva®

EDIZIONE 2015/2016

AGRICOLTURA, ALIMENTAZIONE E SOSTENIBILITA'

Introduzione ai modelli meteo-climatici

Claudio Cassardo, Naima Vela, Valentina Andreoli

***Università degli Studi di Torino, Dipartimento di
Fisica***

Documento di livello: C



Un progetto di


agorà scienza
centro interuniversitario



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TORINO


scienza attiva®

1. Introduzione

La meteorologia ed il clima hanno assunto un ruolo sempre più importante nella vita quotidiana negli ultimi anni. A questo ha sicuramente contribuito il continuo sviluppo della ricerca scientifica, che ha reso disponibili strumenti numerici più accurati e sofisticati in grado di coadiuvare i previsori e gli scienziati nell'interpretazione del tempo meteorologico presente e futuro, e nella comprensione dei fattori che determinano il clima terrestre. Contemporaneamente, lo sviluppo quasi esponenziale del web, dei social network e di tutte le tecnologie di comunicazione moderne ha avuto l'effetto di inondare di prodotti il pubblico. Tuttavia, non è ancora cresciuta di pari passo la consapevolezza necessaria, da parte del pubblico, per sapersi districare nell'offerta eccessiva di prodotti, discriminando tra le informazioni utili e quelle accessorie, o talora anche dannose. Il problema principale risiede nell'incapacità, in generale, di sapere interpretare le potenzialità ed i limiti di tale informazione. Il presente articolo vuole essere una sorta di miniguia in tal senso che, partendo dalla letteratura più recente, si propone di dare una spiegazione minimale utile per valutare l'informazione meteorologica e climatica ormai onnipresente nel mondo di internet.

2. Meteorologia e clima: che confusione!

Non passa settimana che, parlando con la gente o sui media, non si senta affermare che fa freddo, o caldo, o piove troppo, o troppo poco, e che il clima è cambiato. Regna una gran confusione sull'uso dei termini meteorologia e climatologia, e dei concetti ad essi collegati, per cui è opportuno fare chiarezza fin dall'inizio sulla differenza tra meteorologia e climatologia. Meteorologia è una parola di origine greca (μετεωρολογικά, meteorologhica) coniata da Aristotele intorno al 340 a.C., usata come titolo di un suo libro che presenta osservazioni miste a speculazioni sull'origine dei fenomeni atmosferici e celesti. La parola greca μετέωρος (meteoros) indica infatti genericamente oggetti "alti nel cielo", cioè situati tra l'atmosfera e le stelle fisse, mentre il suffisso λογία (loghìa) indica che è un trattato. Nelle epoche successive, il sostantivo meteorologia ha assunto il significato dell'insieme delle condizioni atmosferiche (quello che noi fisici chiamiamo lo stato del sistema), date ad esempio dai valori delle grandezze come temperatura, umidità, velocità e direzione del vento, precipitazione, ecc. osservate in un preciso istante ed in una determinata località. La parola clima, invece, deriva anch'essa dal greco (κλίμα) e significa inclinazione e tendenza, in quanto originariamente era collegata all'inclinazione dei raggi solari rispetto alla verticale e, per estrapolazione, agli effetti di questo fenomeno sulle temperature. Oggigiorno, il clima rappresenta la statistica condotta sul tempo meteorologico osservato in una data regione ed è riferito ad un intervallo di tempo che escluda le ciclicità più evidenti che caratterizzano le variazioni del tempo meteorologico. Le normative dell'Organizzazione Meteorologica Mondiale (WMO) hanno suggerito come intervallo di tempo un periodo di trent'anni, che rappresenta una sorta di compromesso tra la richiesta di un tempo molto lungo, che tenda a mediare il più possibile le fluttuazioni, ed il fatto che - soltanto da poco più di un secolo - sono disponibili serie di osservazioni meteorologiche complete che possano permettere la ricostruzione del clima. Spesso si sente dire che, parlando di meteorologia e clima, anche se l'oggetto di studio delle due discipline è lo stesso (l'atmosfera terrestre), sono le differenti scale temporali a differenziare le due discipline. Questo è in realtà solo parzialmente vero, in quanto il tempo meteorologico dipende prevalentemente dalle caratteristiche attuali dell'atmosfera (temperatura, umidità, vento, composizione, ecc.), alcune delle quali possono essere ipotizzate costanti o quasi nel breve periodo di una previsione meteorologica (alcuni giorni), mentre il clima risente anche di fattori esterni all'atmosfera (distanza Terra-Sole, deriva dei continenti, circolazione oceanica, la variazione dello stato della superficie terrestre, la

composizione dell'atmosfera, ecc.) che, sui tempi lunghi del clima, possono variare anche in modo consistente, e le cui variazioni debbono quindi necessariamente essere tenute in considerazione.

3. Le simulazioni modellistiche in meteorologia

Il concetto di modello riveste oggi una grande importanza in tutte le discipline scientifiche, non solo nella fisica. Il significato originario di modello è quello di riproduzione materiale di un sistema fisico a una determinata scala di riduzione o espansione. Un modello matematico è costituito generalmente da una o più equazioni in cui le singole variabili rappresentano le proprietà dei singoli elementi del sistema reale in studio. In questa prospettiva, il sistema reale può essere scomposto in processi e interazioni fondamentali che possono essere descritte da singole equazioni che vengono inserite nel modello. In questo modo, la previsione numerica del tempo può essere considerata come un'applicazione del metodo sperimentale galileiano (Pasini, 2005) e, a causa della complessità e dell'unicità dell'atmosfera terrestre, e quindi dell'impossibilità di condurre esperimenti reali, il computer può essere visto come un laboratorio virtuale. In esso, lo scienziato ha il controllo completo del sistema virtuale che simula quello reale, e può effettuare o ripetere esperimenti numerici, e modificare con estrema facilità gli elementi teorici del modello e le situazioni degli esperimenti stessi, per esempio cambiando i valori delle variabili.

Premesse queste considerazioni, si può affermare che la stessa dicotomia, di cui si è parlato prima, tra meteorologia e clima, la si ritrova pari pari nei modelli meteorologici e climatici. I modelli meteorologici standard sono sostanzialmente caratterizzati da un trattamento dinamico del solo sistema atmosferico, all'interno del più vasto sistema terrestre; questo significa che le loro equazioni riguardano solamente la dinamica dell'atmosfera, mentre l'interazione con gli altri sottosistemi viene normalmente fornita tramite forzanti e condizioni al contorno. Nei modelli climatici, invece, visti i tempi scala molto maggiori, è necessario simulare in modo esplicito non solo il sistema atmosferico, ma anche gli altri sistemi; per questo motivo, tali modelli vengono ora chiamati “modelli del sistema Terra”.

In ognuno dei due casi, è possibile sviluppare modelli numerici costituiti da uno o più sistemi accoppiati di equazioni differenziali. Le variabili di queste equazioni hanno una corrispondenza nel sistema reale in grandezze misurabili. Così, dando alcuni valori iniziali realistici a ciascuna variabile del modello e impostando le condizioni al contorno, si possono risolvere numericamente queste equazioni, ottenendo una stima dei parametri termodinamici e dinamici più rilevanti in atmosfera o nel sistema terrestre. Questo approccio fu utilizzato per la prima volta – con poco successo e grande fatica, visto che i calcolatori elettronici non esistevano ancora – da Richardson (1922), e successivamente ripreso da Charney et al. (1950). Il successo di questo ultimo tentativo aprì la strada all'uso del computer elettronico per le previsioni meteorologiche.

Un modello meteorologico¹ è costituito da una serie di equazioni differenziali prognostiche per le principali variabili meteorologiche (velocità del vento, temperatura, umidità e pressione), che includono le equazioni della conservazione di quantità di moto, energia e acqua, e l'equazione di stato, alle quali si aggiungono delle equazioni semplificate che tengono conto di tutta una serie di fenomeni che avvengono a scale troppo piccole rispetto alla risoluzione del modello. Inoltre, con il continuo aumento della potenza dei computer, le

¹Qui si fornisce una sintetica disamina delle principali caratteristiche dei modelli numerici di uso in meteorologia e nelle scienze del clima. Per una discussione più completa, si rimanda ad esempio ad alcuni blog tematici, come “Che cosa sono i modelli meteorologici?”, “Le misure necessarie per l'inizializzazione dei modelli per la previsione del tempo” e “L'interpretazione dei prodotti dei modelli meteorologici”.

equazioni utilizzate sono diventate via-via più complete nel tempo, ed anche la loro risoluzione è gradualmente aumentata. Solo per illustrare un esempio, nel 1979, anno in cui fu creato il Centro europeo per le previsioni meteorologiche a medio termine (ECMWF) a Reading, la risoluzione tipica delle uscite del primo modello era di circa 120 km, mentre attualmente si aggira sui 15 km. Un altro componente molto importante della catena previsionale modellistica che è notevolmente migliorata nel tempo è l'inizializzazione dei dati necessaria al modello per il suo funzionamento. Non c'è pertanto da stupirsi se, conseguentemente, l'errore quadratico medio tra i campi previsti e le osservazioni meteorologiche è diminuito progressivamente, con valori di correlazione che ormai arrivano al 95-97% per il terzo giorno di previsione (CSAEOS, 2008). Modelli come l'IFS (Integrated Forecasting System) che gira all'ECMWF, o il GFS (Global Forecasting System) sviluppato dal National Weather Service (NWS) della National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), sono chiamati globali, e sono noti in gergo come General (o Global) Circulation Models (GCM), in quanto “girano” sull'intero globo terrestre. La configurazione corrente dell'IFS è la TL1279L91, che corrisponde ad una distanza tra punti griglia di circa 0.15° di risoluzione orizzontale in latitudine e longitudine (pari a circa 15 km alle nostre latitudini) e 91 livelli verticali. Questo significa che, sul globo, ad ogni livello verticale ci sono due milioni di punti griglia, ed in tutto ce ne sono circa 182 milioni. Su ognuno di tali punti griglia vengono risolte tutte le equazioni ad ogni time step (normalmente di qualche secondo), le quali necessitano di dati di input che debbono essere forniti anch'essi su ogni punto griglia, a partire dalle osservazioni (ci sono meno di mille stazioni di radiosondaggio verticale che operano due volte al giorno, e qualche decina di migliaia di stazioni meteo che inviano regolarmente i loro dati alla rete meteorologica mondiale), con opportuni algoritmi interpolativi.

Non tutti i modelli meteorologici considerano l'intera atmosfera terrestre. Per ottenere una risoluzione maggiore, esistono altri modelli, detti ad area limitata (Limited Area Models, o LAM) oppure alla mesoscala, che studiano soltanto una porzione di atmosfera, normalmente limitata ai bordi laterali. Il vantaggio di questi modelli è che possono, a parità di risorse di calcolo, dettagliare maggiormente la previsione, risolvendo anche processi a scala più piccola del grigliato dei modelli globali. Il calcolo è presto fatto: partendo dal numero di punti griglia del modello globale GFS e immaginando di farlo girare su un'area comprendente l'Europa (per esempio nel “rettangolo” compreso tra le latitudini 30°N e 75°N , e le longitudini 30°O e 45°E), si ottiene che, imponendo lo stesso numero di punti griglia del modello globale, essi risulterebbero spazati di circa 0.011° in latitudine e longitudine, ovvero poco più di un chilometro. E infatti i LAM più risolti oggi hanno proprio passi griglia dell'ordine di 1 km, o anche meno. Naturalmente, i LAM necessitano dei dati al contorno sui loro bordi, per cui debbono essere fatti “girare” dopo i GCM per usarne le loro uscite. Con la disponibilità di questo tipo di prodotti, è possibile avere previsioni meteorologiche di alta precisione a grande scala e anche previsioni accurate alla mesoscala e alla scala locale (Fig. 1). Pertanto, in linea di principio, può essere possibile fornire alcune segnalazioni nel caso in cui alcuni eventi estremi o pericolosi siano previsti a medio termine. Torneremo a breve su questo tema.

4. Quanto sono attendibili le previsioni dei modelli meteorologici?

Le equazioni che regolano la dinamica atmosferica o dei fluidi sono non lineari. In un sistema non lineare, non è soddisfatto il principio di sovrapposizione: cioè, non è vero che l'output sia proporzionale all'input. Oltre che a essere difficili da risolvere – nel caso delle equazioni che regolano la dinamica atmosferica, basate sulle equazioni di Navier-Stokes per il flusso del fluido atmosferico, esse sono addirittura analiticamente non risolubili – i sistemi non lineari mostrano spesso un comportamento straordinariamente complesso e caotico. Tale fenomeno è attualmente ben noto (Lorenz, 1972) e caratterizza tutti i GCM, rendendo di fatto impossibile l'effettuazione di previsioni meteorologiche precise a

lungo termine. Si noti che uno può sempre eseguire una simulazione che duri diversi mesi ed analizzarne i risultati; il problema è che tali risultati diventano completamente svincolati dall'andamento reale dopo alcuni giorni, per cui non hanno alcuna utilità dal punto di vista della previsione del tempo.

L'impossibilità di stabilire, a priori, l'esattezza di una previsione affidandosi ad un'unica previsione deterministica ha portato a sviluppare una nuova tecnica di previsione nella quale si integrano simultaneamente più stati dell'atmosfera caratterizzati da condizioni iniziali che differiscono di poco l'una dall'altra. Con questa nuova tecnica, nota con il nome di ensemble predictions (previsioni di insieme), lo scenario meteorologico previsto è quindi legato alla frequenza con cui il pattern atmosferico ricorre nella gamma di tutte le previsioni calcolate. Tale sistema diventa particolarmente utile nei casi in cui si verificano transizioni nei regimi meteorologici che i modelli prevedono con maggiore difficoltà.

In pratica, si eseguono diverse simulazioni con i GCM perturbando le condizioni iniziali di una corsa di riferimento, e si analizzano gli andamenti risultanti. Indagando lo spazio dei possibili risultati a partire da un dato stato iniziale (incerto), le previsioni di insieme permettono quindi ai previsori di valutare i possibili risultati stimandone le possibilità di accadimento, e quindi di comunicare i possibili rischi agli utenti. Sottolineiamo qui la frase "permettono ai previsori di ...": il ruolo degli esperti nell'interpretare le previsioni e spiegarne gli eventuali rischi correlati rimane fondamentale anche nell'epoca dei modelli numerici, in cui si potrebbe credere di essere in grado di realizzare un centro meteo, o addirittura un servizio meteorologico, semplicemente assemblando le uscite dei modelli fatti girare da altri, senza la necessità di persone qualificate che ne interpretino le uscite. Al giorno d'oggi, i vari centri meteorologici fanno ampio uso delle previsioni di insieme, che vengono affiancate alle previsioni deterministiche. La tecnica è stata applicata per la prima volta nel 1992 sia all'ECMWF, sia al NCEP.

A titolo di esempio, mostriamo (Fig. 2) due previsioni della temperatura a 2 metri dal suolo per Londra, a partire dal 26 giugno di due anni consecutivi, 1994 e 1995. Le curve rosse sottili mostrano i singoli membri di una previsione di insieme. La diffusione delle previsioni appare molto diversa nei due casi, pur trattandosi dello stesso giorno dell'anno (quindi stessa stagione, nella stessa località). Questo dimostra che alcune condizioni iniziali sono più prevedibili di altre: in un caso si ha una dispersione delle previsioni del modello molto elevata, nell'altro no. Si nota anche come, in entrambi i casi, le osservazioni reali si trovino all'interno del fascio delle linee rosse così come la previsione deterministica, ma siano "distanti" tra loro.

Normalmente i risultati delle previsioni di insieme sono sintetizzati in grafici (Fig. 2) o mappe bidimensionali (Fig. 3), che in gergo vengono chiamati "spaghetti plot". L'analisi della Fig. 3 mostra già chiaramente da sola come debbano poi interpretarsi le mappe previsionali alla luce delle informazioni aggiuntive fornite dagli spaghetti plot. È importante capire, in primo luogo, che le previsioni non hanno dappertutto lo stesso grado di attendibilità. Ad esempio, guardando gli spaghetti plot di Fig. 3, il tempo sulla Groenlandia occidentale appare incerto già dal martedì 22 (secondo giorno di validità della previsione), mentre sul Regno Unito si comincia a notare una divergenza delle isoipse soltanto nel giorno di venerdì 25 (quinto giorno). È comunque chiaro che la significatività delle tre ultime mappe, relative ai giorni da domenica 27 aprile (settimo giorno) in poi, è assolutamente nulla e non consente alcun tipo di previsione oggettiva. Dovrebbe quindi apparire abbastanza chiaro, a questo punto, come gli spaghetti plot e, in generale, i prodotti delle previsioni di insieme, possano consentire di attribuire un indice di affidabilità alla previsione. È infatti importante essere a conoscenza del fatto che una previsione meteorologica non è mai, e non potrebbe mai neppure esserlo, assimilabile ad una certezza, ma rappresenta uno scenario evolutivo più o meno probabile, a seconda di quanto lontano si va nel tempo, allo stesso modo di come un dottore che fa una

diagnosi dello stato di un paziente, emette poi una prognosi relativa all'evoluzione più probabile (ma mai certa) della sua patologia.

Da ultimo, vorrei aggiungere che la discussione precedente ha riguardato i modelli globali, poiché normalmente sono questi ad essere fatti girare per lungo tempo (fino a 15 giorni). Si potrebbe pensare che un modello a mesoscala o locale, avendo un grigliato più fitto, possa consentire una notevole riduzione degli errori e quindi possa superare questo problema. La realtà dimostra che non è così, in quanto gli errori dovuti all'interpolazione delle uscite del GCM sui bordi del grigliato del LAM si propagano rapidamente all'interno nel tempo, ed è questo il motivo per cui raramente le corse dei modelli alla mesoscala o LAM si estendono oltre i 3-5 giorni.

5. I modelli climatici

Come abbiamo visto, nei modelli meteorologici il sistema che viene descritto dinamicamente è l'atmosfera, mentre nei modelli climatici o del sistema Terra, che hanno lo scopo di prevedere le condizioni climatiche su un periodo molto più lungo (da un trentennio a un secolo, o ancor più), tutto ciò che sta alla sua interfaccia, e che può influenzarne il comportamento, non può essere considerato costante, in quanto i sottosistemi hanno delle loro dinamiche che interagiscono con la dinamica dell'atmosfera in modo complesso; un esempio tipico è l'interazione atmosfera-oceano. In questi modelli climatici, i vari sottosistemi vengono descritti nelle loro dinamiche interne e nelle reciproche interazioni mediante sistemi di equazioni accoppiate. La tendenza nello sviluppo di questi modelli, che sono curiosamente anch'essi noti con l'acronimo di GCM (Global Climate Model), è quella di inserire il maggior numero di sottosistemi nella descrizione dinamica interagente, in modo da riprodurre realisticamente i maggiori feedback. I modelli climatici attuali riescono a descrivere le dinamiche accoppiate di atmosfera, oceani, ghiacci, litosfera, vegetazione, e anche le principali reazioni chimiche, mentre le influenze umane sono ancora in gran parte considerate come fattori esterni.

Una domanda che spesso si sente porre è la seguente: dal momento che il disegno di questi modelli climatici ricalca lo schema deterministico dei modelli meteorologici, e che si è visto come questi ultimi non sono in grado di fornire soluzioni deterministiche valide per più di 10-15 giorni, come si può pretendere di ricostruire o prevedere il clima di un trentennio o più? La risposta a questa domanda risiede nella definizione statistica di clima. Come detto sopra, il clima di una determinata zona comprende l'insieme delle condizioni fisiche e meteorologiche che si verificano in un certo arco di tempo (almeno 30 anni, come prescrive l'Organizzazione Meteorologica Mondiale). Più precisamente, per definire il clima occorre valutare i valori medi e la variabilità (ad esempio, in termini di deviazioni standard ed eventi estremi) di una serie di grandezze, come la temperatura e le precipitazioni. Il clima, dunque, è descritto dall'analisi statistica dei dati che si possono estrarre dall'insieme delle realizzazioni degli stati del tempo meteorologico in una data zona e in un certo periodo. Per questo motivo, anche se i modelli climatici forniscono delle uscite, per quanto riguarda l'atmosfera, assimilabili a quelle di un modello meteorologico, è il modo di utilizzarle che cambia: non si deve più guardare ai singoli valori previsti, che corrispondono allo stato del tempo in un determinato istante ed in una certa zona, perché tanto si sa che essi non sono deterministicamente attendibili, ma si deve valutare la statistica, in termini di medie e variabilità per grandezze rilevanti dal punto di vista climatico, sulle uscite di uno o più modelli, in modo da arrivare ad una determinazione delle caratteristiche climatiche di quella zona.

In questo nuovo contesto, quindi, il caos deterministico che affligge le previsioni meteorologiche non è più un problema. Al contrario, esso descrive quella variabilità che rende possibile il realizzarsi di una statistica

di stati diversi, e dunque permette di poter determinare il clima. Naturalmente, diventa necessario verificare se effettivamente uno o più modelli riescono a ricostruire le caratteristiche principali del clima: questo lo si può ovviamente fare soltanto con il clima passato e presente, in quanto si possono usare i dati osservati, ed è stato effettivamente fatto per i GCM e anche alcuni modelli a scala regionale sul passato recente (generalmente gli ultimi 150 anni: Fig. 4). Inoltre, dal momento che è possibile effettuare esperimenti alterando a piacere i dati di ingresso di tali modelli, sono state anche eseguite delle analisi di causalità, in modo da valutare le forzanti più importanti del recente cambiamento climatico (Fig. 4). Una volta appurato che i risultati di tali controlli sono soddisfacenti, il modello può essere applicato alla previsione sul futuro, ovviamente fornendo i valori delle forzanti e delle condizioni al contorno sul periodo di interesse. Dal momento che le concentrazioni future di gas serra sono il prodotto di sistemi dinamici molto complessi, determinati da forze motrici come l'espansione demografica, lo sviluppo economico delle varie nazioni, lo sviluppo tecnologico, la disponibilità di materie prime e risorse, e tante altre, che determinano le emissioni future, è evidente che la loro evoluzione futura è molto incerta. A partire dall'ultimo decennio dello scorso secolo, i climatologi hanno quindi sviluppato dei modelli che prevedessero valori realistici delle emissioni di gas serra, in modo da poter valutare le concentrazioni risultanti in atmosfera e poter conseguentemente inizializzare i modelli climatici. Hanno scelto di ipotizzare diverse famiglie di scenari di emissioni corrispondenti a diversi gradi di sviluppo, denotati con delle lettere (A1, A2, B1, B2, ecc.). Tali scenari sono immagini alternative di come il futuro potrebbe svolgersi e sono uno strumento adeguato con cui analizzare come le summenzionate forze motrici potrebbero influenzare le emissioni future; essi sono pertanto strumenti indispensabili per le analisi sul cambiamento climatico, compresa la modellistica del clima, per valutarne le incertezze associate e gli impatti, e per impostare le strategie di adattamento e mitigazione più opportune.

Più recentemente, i climatologi hanno preso in considerazione, tra tutti gli scenari possibili, una famiglia di curve, denotate con il nome di "percorsi di concentrazione rappresentativi" (RCP, acronimo di Representative Concentration Pathways), che rappresentano andamenti possibili delle concentrazioni (non emissioni) di gas serra nel XXI secolo che, alla luce delle simulazioni dei principali modelli climatici attualmente disponibili, potrebbero comportare valori specifici della forzante radiativa da gas serra. Tali valori, adottati poi anche dall'IPCC nella quinta relazione di valutazione (IPCC, 2013), sono stati chiamati RCP2.6, RCP4.5, RCP6 e RCP8.5 (Weyant et al., 2009) in quanto richiamano quattro possibili valori di forzante radiativa nel 2100 rispetto ai livelli preindustriali: valori (2.6, 4.5, 6.0, e 8.5 W m⁻², rispettivamente). Sono questi gli scenari usati nell'ultimo rapporto IPCC (2013).

6. La gestione del rischio

Oggi, il più delle volte, le persone ritengono poco probabili gli eventi estremi (ondate di caldo e freddo, alluvioni e siccità, ma anche cicloni tropicali, grandinate, tempeste di vento, ecc.), e la percezione di questo rischio è piuttosto debole. Tuttavia, l'evidenza recente e le prospettive future fanno paventare una crescita della loro intensità e frequenza, per effetto dei cambiamenti climatici in corso e previsti. Una conseguenza possibile potrebbe essere la diffusione di un senso di panico, di ansia sociale, che non aiuterebbe certo a compiere azioni razionali. L'opzione contraria, però, ovvero sottovalutare i rischi, potrebbe avere d'altra parte conseguenze ancora più tragiche o quantomeno onerose in termini economici e di fatalità.

Come trovare un giusto equilibrio tra i due stati opposti di ottimismo ingiustificato e ansia perenne? La strada maestra consiste nella preparazione di un sistema che possa rendere i cittadini pronti e nello stesso tempo fiduciosi nelle proprie capacità di reagire agli eventi, poiché questo circolo virtuoso aumenterebbe la sensazione di controllo sugli stessi e ridurrebbe l'incertezza cognitiva. Infatti, pur confidando in un

miglioramento futuro dei sistemi di previsione, la complessità e non linearità del sistema atmosferico lascerà sempre un margine di incertezza non eliminabile: le previsioni saranno, intrinsecamente, di tipo probabilistico sia per quanto concerne la localizzazione spazio-temporale degli eventi che per la loro intensità.

Il rischio di mancati o falsi allarmi non è azzerabile, ma si potrà superare realizzando e condividendo procedure di gestione delle allerte molto chiare, che tengano conto delle incertezze. Cosa fare o cosa non fare dovrà essere invece dedotto dal risultato di analisi costi/benefici, e non sulla base di azioni improvvisate o dettate “dalla pancia”. Nello specifico e per quanto riguarda specificatamente il nostro Paese, considerato l’attuale rischio idrogeologico, già di per sé molto elevato, e la minaccia di un suo ulteriore innalzamento a causa dei cambiamenti climatici, occorrerà quindi predisporre e attivare piani di protezione civile o di emergenza, nazionali e decentrati, con procedure chiare e definite anche nel processo di comunicazione, che è assolutamente complementare a tutta la gestione operativa, come confermato più volte dalle recenti esperienze di eventi estremi in Italia².

Bibliografia

Charney J.G., Fjortoft R., and von Neumann J., “Numerical integration of the barotropic vorticity equation”, *Tellus*, 2, pp. 237-254, 1950.

CSAEOS (Committee on Scientific Accomplishments of Earth Observations from Space), *Earth Observations from Space: The First 50 Years of Scientific Achievements*, The National Academies Press, Washington D.C., 144 pp., 2008.

IPCC, *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [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, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp, doi:10.1017/CBO9781107415324, 2013.

Lorenz E.N. (1972). Predictability: does the flap of a butterfly's wings in Brazil set off a tornado in Texas? 139th Annual Meeting of the American Association for the Advancement of Science (29 Dec 1972), in *Essence of Chaos* (1995), Appendix 1, 181.

Pasini A., *From Observations to Simulations. A Conceptual Introduction to Weather and Climate Modelling*, World Scientific Publishers, Singapore, 216 pp., 2005.

Richardson L.F., “*Weather Prediction by Numerical Process*”, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 236 pp., 1922.

Weyant J., Azar C., Kainuma M., Kejun J., Nakicenovic N., Shukla P.R., La Rovere E., YOHE G., *Report of 2.6 Versus 2.9 Watts/m2 RCP Evaluation Panel*, Geneva, Switzerland, IPCC Secretariat, 81 pp., 2009.

²Si suggerisce, a questo proposito, la lettura del blog “La gestione dei rischi in un clima mutato – parte III – le criticità”, da cui sono anche tratte alcune informazioni riportate in questo paragrafo.

Figure

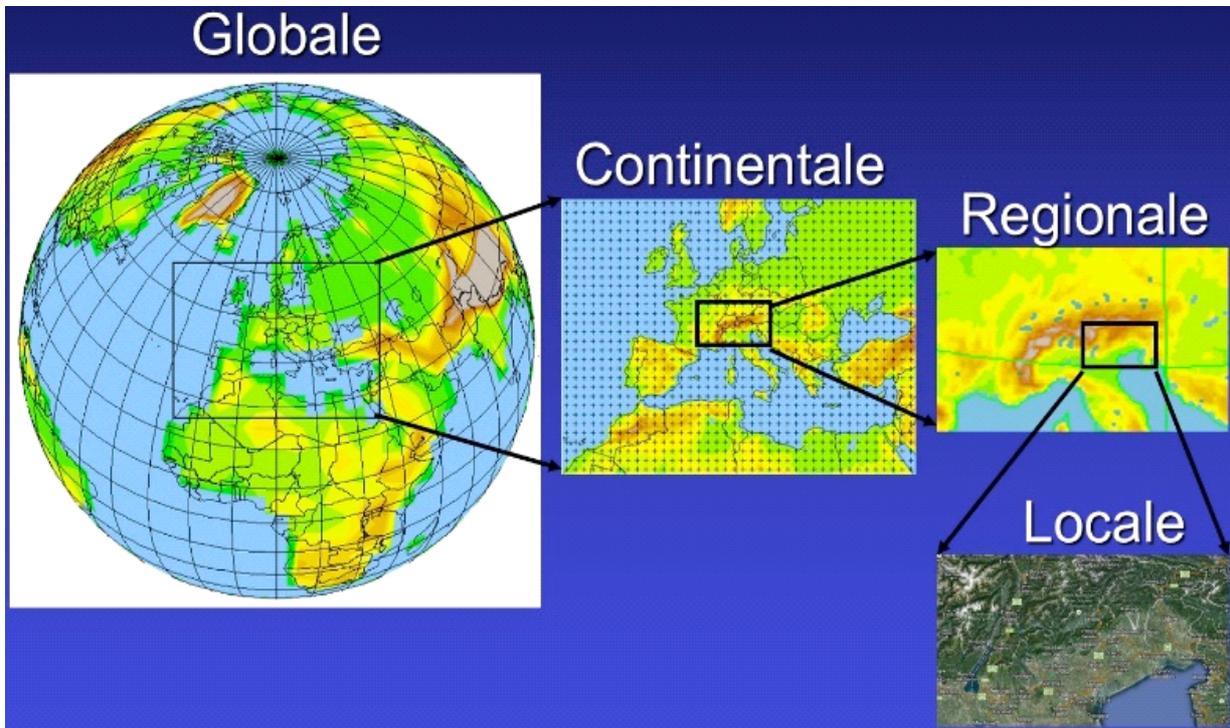


Fig. 1 – Esempio di una catena modellistica: per avere una previsione a scala locale, per esempio relativa ad una o più province, si usano le uscite di un GCM per inizializzare un LAM, e a cascata eventualmente altri LAM fino ad arrivare al dettaglio desiderato.

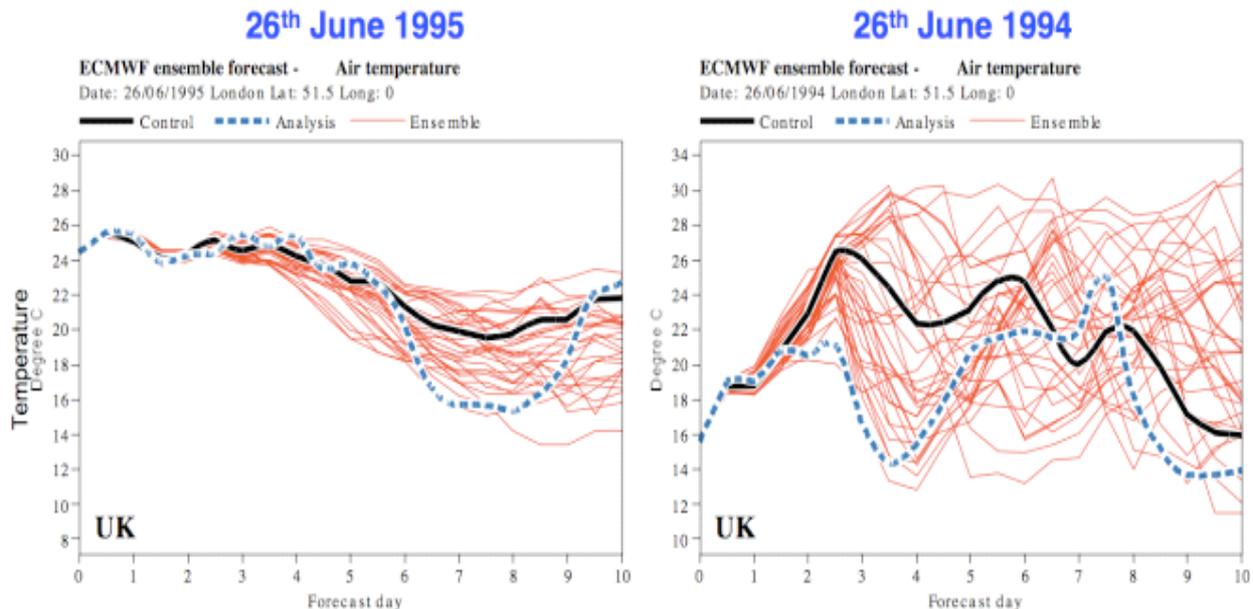


Fig. 2 – Esempio di una serie temporale delle integrazioni numeriche relative alle previsioni di insieme del modello IFS dell'ECMWF per la temperatura superficiale su Londra. Le due mappe si riferiscono esattamente a un anno di distanza l'una dall'altra. In ogni mappa, la linea continua nera spessa indica la previsione deterministica del modello, mentre la tratteggiata blu indica le osservazioni. In rosso sono invece

indicate le previsioni dei vari run ottenuti perturbando le condizioni iniziali (previsioni di ensemble). Grafico adattato dalle previsioni fornite dall'ECMWF.

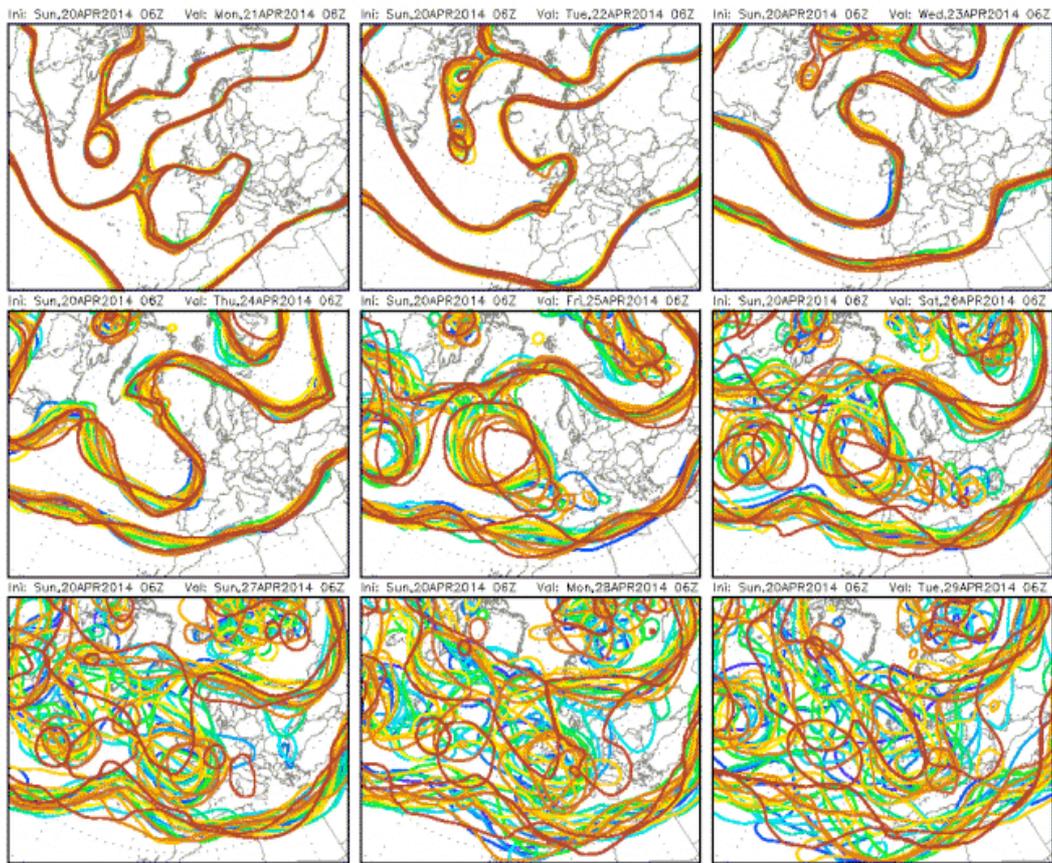


Fig. 3 – Esempio di spaghetti plot relativi alle altezze di geopotenziale a 500 hPa previste dalle previsioni di ensemble del modello GFS girato il 20 aprile 2014 alle 06 UTC. Fonte: wetterzentrale.de.

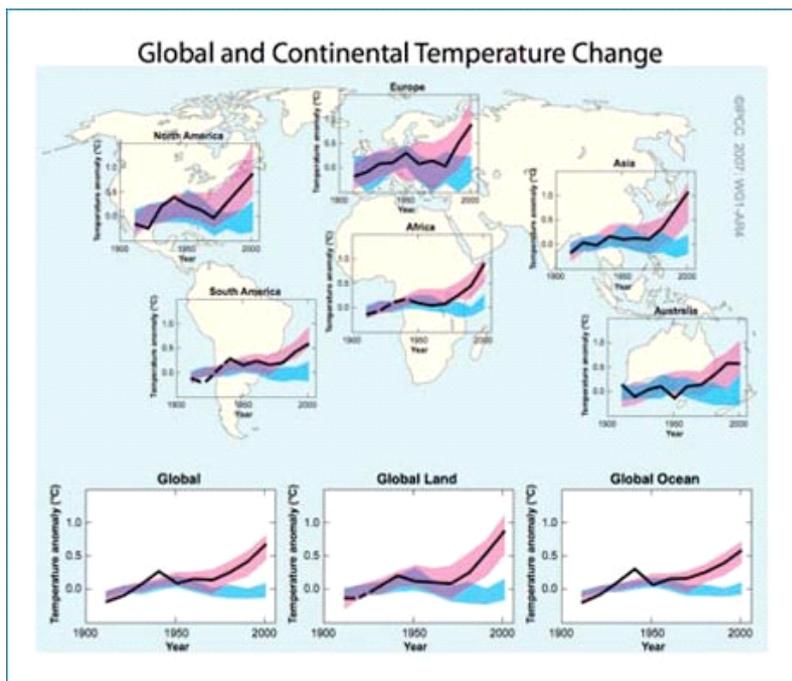


Fig. 4 – Validazione ed analisi di causalità a livello globale e continentale mediante l'integrazione di diversi modelli climatici sull'ultimo secolo. La linee nere mostrano gli andamenti osservati delle temperature nell'ultimo secolo; le fasce rosa indicano le ricostruzioni ottenute dalle corse di vari modelli che utilizzano solo le variazioni reali delle forzanti naturali, mentre le fasce azzurre indicano le ricostruzioni ottenute utilizzando anche i dati reali delle forzanti antropogeniche. I risultati mostrano come le sole forzanti naturali non riescano a spiegare il comportamento reale delle temperature e come, pertanto, le cause antropogeniche siano state fondamentali nel determinare l'andamento termico dell'ultimo secolo, in modo particolare in relazione all'ultimo trentennio del secolo (figura tratta dal Summary for Policymakers del Working Group I dell'IPCC: disponibile online al sito www.ipcc.ch).