

Piattaforma Clima Nord-Est: approfondimento Proiezioni Climatiche

Cambiamenti climatici e loro simulazione modellistica

L'influenza dell'uomo sul clima è indiscutibile e l'aumento della concentrazione di gas serra dal 1750 in poi è inequivocabilmente causato dalle attività umane. Il cambiamento climatico sta già colpendo ogni regione abitata in tutto il mondo, anche le nostre (IPCC, 2021; IPCC, 2023).

Inoltre, l'area del Mediterraneo, di cui facciamo parte, è un **hot-spot** del cambiamento climatico, è cioè un'area in cui le forzanti climatiche (ad esempio: aumento delle temperature, diminuzione delle precipitazioni estive) più severe e la vulnerabilità del territorio più accentuata rispetto ad altre regioni portano a rischi climatici più gravi (Giorgi e Lionello, 2008; Ali et al., 2022).

Una precisa valutazione del cambiamento climatico e della sua variabilità a scala regionale è cruciale per stimare i potenziali impatti dei cambiamenti climatici in futuro, per lo sviluppo di strategie di adattamento (processo di adeguamento al clima attuale o atteso e ai suoi effetti, al fine di limitare i danni o sfruttare le opportunità favorevoli) e per valutare l'importanza delle azioni di mitigazione (qualsiasi intervento umano che riduca le emissioni o rafforzi le fonti di assorbimento dei gas serra) (IPCC, 2018; IPCC, 2022).

Per descrivere il clima futuro è necessario l'utilizzo di modelli climatici. Esistono i modelli climatici a scala globale (GCM) con una risoluzione tipica di 100 km, che nelle aree caratterizzate da una topografia complessa non riescono a descrivere in modo preciso diverse variabili, per esempio, quelle relative ai processi idrologici (ISPRA, 2015).

Esistono poi i **modelli climatici regionali** (RCM), che attraverso un downscaling dinamico, cioè utilizzando i GCM come condizioni al contorno e condizioni iniziali, riescono ad aumentare di un ordine di grandezza la risoluzione spaziale e quindi a descrivere meglio i processi a scala regionale (Giorgi e Lionello, 2008).

Per realizzare **studi di impatto**, gli output degli scenari forniti dai modelli climatici regionali (RCM) non sono direttamente utilizzabili in termini assoluti. Le simulazioni dei RCM, infatti, sono affette da variabilità e imprecisioni (*bias*) - insiti nei modelli stessi e frutto delle parametrizzazioni - che devono essere corretti con metodi di *bias-correction*, per riportare il modello vicino alla realtà osservata e poter utilizzare le simulazioni stesse in termini assoluti (Maraun et al., 2010).

Nella Piattaforma **Clima Nord-Est** (CliNE) vengono presentate delle proiezioni climatiche a cui è stata applicata una tecnica di *bias-correction* che cerca di colmare il divario tra gli effetti a scala più ampia e quelli locali per l'area del nord-est d'Italia.

Fonte dei dati, modellistica e metodologia di analisi

Il dataset di partenza è costituito dalle proiezioni climatiche del progetto **EURO-CORDEX** (Jacob et al., 2014; <http://www.euro-cordex.net/>), che rappresenta lo stato dell'arte dei modelli climatici regionali (RCM) su scala europea in termini di risoluzione spaziale.

Le simulazioni utilizzate comprendono l'intera area europea (dominio EUR-11) e sono caratterizzate da un passo di griglia di 0.11° (circa 11-12 km). Gli RCM del progetto EURO-CORDEX sono innestati in diversi GCM frutto del CMIP5 (5^a fase del Coupled Model Intercomparison Project; Taylor et al, 2012).

Esse si dividono in simulazioni storiche (dal 1950 al 2005), che rappresentano lo stato attuale del clima, e simulazioni di scenario (2006-2100) e cioè proiezioni del clima futuro a partire da alcuni scenari futuri di emissione. Tali scenari di emissione si chiamano *Representative Concentration Pathways* (RCP) e rappresentano differenti forzanti radiative: RCP2.6 (2.6 W/m^2), RCP4.5 (4.5 W/m^2) e RCP8.5 (8.5 W/m^2) (Moss et al., 2010). RCP2.6 corrisponde allo scenario con **forte mitigazione** delle emissioni di gas serra, ovvero una concentrazione in atmosfera di CO₂ entro il 2100 pari a quella attuale (circa 420 ppm) e che mira a mantenere il riscaldamento globale entro i 2°C rispetto ai valori preindustriali, come previsto dall'Accordo di Parigi (del 2015); RCP4.5 corrisponde ad uno scenario intermedio di **stabilizzazione**, ovvero la concentrazione di CO₂ si stabilizza entro fine secolo a 538 ppm; RCP8.5 corrisponde allo scenario **senza mitigazione** e con emissioni via via crescenti, il cosiddetto *business-as-usual* e a una concentrazione di CO₂ entro fine secolo che supera i 900 ppm (IPCC, 2013; IPCC, 2014).

Il dataset originario contiene diverse variabili giornaliere, tra cui temperatura minima, media, massima e precipitazione media. Esso è scaricabile in formato NetCDF dal Earth System Grid Federation (ESGF; <https://esgf-data.dkrz.de/projects/esgf-dkrz/>).

Fra tutte le simulazioni presenti ne sono state selezionate 5 sulla base dei criteri seguenti (ARPA FVG, 2018): disponibilità di dati per tutti e tre gli scenari; inclusione di modelli ad alta, media e bassa sensibilità climatica (i.e. risposta ad un dato aumento di gas serra); performance relativamente buona nel riprodurre la climatologia per il periodo storico considerato (i.e. 1976-2005).

In tal modo si è ottenuto il dataset caratterizzato dalle seguenti coppie di GCM_RCM:

- EC-EARTH_CCLM4-8-17 (Climate Limited-area Modelling Community)
- EC-EARTH_RACMO22E (Royal Netherlands Meteorological Institute)
- EC-EARTH_RCA4 (Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Rossby Centre)
- HadGEM2-ES_RACMO22E (Royal Netherlands Meteorological Institute)
- MPI-ESM-LR_REMO2009 (Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Climate Service Center, Max Planck Institute for Meteorology)

E' stata poi calcolata la media di ensemble di questi 5 modelli. Gli output sono stati riportati su una griglia regolare di passo 0.10° (circa 11 km) corrispondente all'area del Triveneto (lat: 44.55° - 47.35° lon: 10.10° - 14.20°) con una rimappatura basata su una media pesata sulla distanza.

Successivamente è stato utilizzato il metodo del *linear scaling* per correggere l'errore delle variabili di precipitazione e temperatura giornaliera (Leander and Buishand, 2007).

Per eseguire il linear scaling della **precipitazione** è stato utilizzato il dataset del progetto **ArCIS** (Pavan et al., 2019; www.arcis.it/wp), che fornisce un grigliato di precipitazione giornaliera sull'area del centro-nord Italia con passo di griglia di circa 5 km.

Per la **temperatura** è stato costruito un grigliato a livello mensile di temperatura massima e minima di passo circa 500 m, con un processo di regressione multi-lineare - che tiene conto di altezza, distanza dalla costa, morfologia e pendenza del terreno - a partire dalle misure giornaliere della **rete delle stazioni meteorologiche di Arpav, rete meteorologica regionale del FVG, rete ex Ufficio Idrografico e rete Aeronautica Militare** sul periodo 1976-2005 (Massaro et al., 2022).

Gli output dei 5 RCM selezionati sono stati rimappati sulla griglia delle misure da stazione (5 km per la precipitazione, 500 m per la temperatura), considerando il punto di griglia più vicino.

Le correzioni del linear scaling per la precipitazione e la temperatura si basano, rispettivamente, sui rapporti e sulle differenze tra misure e modello sul singolo punto di griglia e vengono calcolate a livello mensile.

Il linear scaling è stato applicato a tutti gli indicatori che si basano sul valore assoluto e a quelli di anomalia basati su soglia fissa.

Tutte le simulazioni modellistiche sono caratterizzate da un certo grado di **incertezza**, che è dovuto essenzialmente allo scenario di emissione, alla rappresentazione dei processi fisici (fisica delle nubi, bilancio energetico alla superficie, ...) e alla variabilità naturale del sistema climatico (Cubash et al, 2001). L'incertezza dei modelli considerati è fornita dalla **deviazione standard** dell'insieme di modelli considerati (Giorgi, 2005). Nell'utilizzo delle proiezioni, la media di ensemble può essere considerata come la proiezione futura più probabile, ma l'incertezza fornita dai diversi output delle varie simulazioni modellistiche va sempre tenuta in considerazione.

In CliNE, infatti, per le **anomalie trentennali** se la media di ensemble è inferiore alla deviazione standard dei 5 modelli significa che questi ultimi sono in disaccordo (Stocker et al., 2013) e pertanto si considera la proiezione incerta; per le **serie temporali** puntuali, oltre alla media di ensemble, vengono calcolati anche gli estremi superiore e inferiore di incertezza, computati come media di ensemble +/- la deviazione standard dei 5 modelli.

Dettagli sugli indicatori

Nella tabella seguente è riportato l'elenco completo di quantità, periodi, stagioni, passo di griglia per ciascun indicatore presente in CliNE; per ognuno viene specificato se è stato operato il bias-correction (acronimo BC in tabella). Per tutti gli indicatori è fornito l'output per tutti i 5 modelli e media ensemble per i 3 RCP considerati (RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5).

Indicatore	Media trentennale	Media annuale
TAS;	- 2 anomalie (2021-2050; 2071-2100)	- anomalia/valore assoluto BC
TASMIN;	- 4 stagioni	1976-2100
TASMAX	- griglia 11km	- 4 stagioni+annuale
		- griglia 11km/500m

TR; SU30; FD	- 2 anomalie BC (2021-2050; 2071-2100) - annuale - griglia 500m	- valore assoluto BC 1976-2100 - annuale - griglia 500m
HDDs; CDDs	- 2 anomalie BC (2021-2050; 2071-2100) - annuale - griglia 500m	- valore assoluto BC 1976-2100 - annuale - griglia 500m
HWDI	- 2 anomalie (2021-2050; 2071-2100) - estate - griglia 11km	//
PR	- 2 anomalie (2021-2050; 2071-2100) - 4 stagioni - griglia 11km	- anomalia/valore assoluto BC 1976-2100 - 4 stagioni+annuale - griglia 11km/5km
R95pTOT	- 2 anomalie (2021-2050; 2071-2100) - 4 stagioni - griglia 11km	//
CDD	- 2 anomalie BC (2021-2050; 2071-2100) - 4 stagioni - griglia 5km	//
SNWDAYS	- 2 anomalie BC (2021-2050; 2071-2100) - annuale - griglia 5km	- valore assoluto BC 1976-2100 - annuale - griglia 5km

Elenco completo di quantità, periodi, stagioni, passo di griglia per ciascun indicatore presente in CliNE. Per gli indicatori con "BC", significa che è stato operato il bias-correction.

Riferimenti bibliografici

Ali, E., W. Cramer, J. Carnicer, E. Georgopoulou, N.J.M. Hilmi, G. Le Cozannet, and P. Lionello, 2022: Cross-Chapter Paper 4: Mediterranean Region. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 2233-2272, doi:10.1017/9781009325844.021.

ARPA FVG, 2018. 1.2 VARIABILITÀ CLIMATICA FUTURA, Proiezioni climatiche in FVG Gallina e Giorgi.

Giorgi, F. (2005). Climate change prediction. *Climatic Change*, 73(3), 239-265.

Giorgi, F., Jones, C., and Asrar, G. R. (2009). Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework. *World Meteorological Organization (WMO) Bulletin*, 58(3), 175.

Giorgi, F., and Lionello, P. (2008). Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and planetary change*, 63(2-3), 90-104.

Jacob D, Petersen J, Eggert B, Alias A, Christensen, OB, Bouwer LM, Braun A, Colette A, Déqué M, Georgievski G, Georgopoulou E, Gobiet A, Menut L, Nikulin G, Haensler A, Hempelmann N, Jones C, Keuler K, Kovats S, Kröner N, Kotlarski S, Kriegsmann A, Martin E, van Meijgaard E, Moseley C, Pfeifer S, Preuschmann S, Radermacher C, Radtke K, Rechid D, Rounsevell M, Samuelsson P, Somot S, Soussana JF, Teichmann C, Valentini R, Vautard R, Weber B and Yiou P. (2014). EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, 14:563-578.

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* [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.

IPCC, 2014: *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

IPCC, 2018: Annex I: Glossary [Matthews, J.B.R. (ed.)]. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 541-562, doi:[10.1017/9781009157940.008](https://doi.org/10.1017/9781009157940.008).

IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. In Press.

IPCC, 2022: Summary for Policymakers [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem (eds.)]. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3-33, doi:[10.1017/9781009325844.001](https://doi.org/10.1017/9781009325844.001).

IPCC, 2023: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment*

Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001

ISPRA, 2015. Calibrazione e testi di metodi per il downscaling empirico-statistico e la correzione degli errori dei modelli climatici. Stato dell'Ambiente 56/2015. ISBN 978-88-448-0707-8

Leander, R., and Buishand, T. A. (2007). Resampling of regional climate model output for the simulation of extreme river flows. *Journal of Hydrology*, 332(3-4), 487-496.

Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., Van Vuuren, D. P., ... and Meehl, G. A. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282), 747-756.

Maraun, D., Wetterhall, F., Ireson, A. M., Chandler, R. E., Kendon, E. J., Widmann, M., ... and Thiele-Eich, I. (2010). Precipitation downscaling under climate change: Recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user. *Reviews of geophysics*, 48(3).

Massaro G., Gallina V., Cicogna A., Zecchini F., Rech F., Dalan F., Ferrario M.E., Micheletti S., and Lionello P. (2022). *Proceedings of the 2a Conferenza Nazionale sulle Previsioni Meteorologiche e Climatiche*.

Pavan, V., Antolini, G., Barbiero, R., Berni, N., Brunier, F., Cacciamani, C., ... and Malaspina, T. T. (2019). High resolution climate precipitation analysis for north-central Italy, 1961–2015. *Climate Dynamics*, 52(5), 3435-3453.

Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, L.V. Alexander, S.K. Allen, ... and S.-P. Xie (2013). Technical Summary Supplementary Material. 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* [Stocker, T.F., D. Qin, ... and P.M. Midgley (eds.)]. Available from www.climatechange2013.org and www.ipcc.ch.

Taylor K, Stouffer RJ, Meehl GA (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bull Am Meteorol Soc* 93:485–498.

Riconoscimenti

La realizzazione tecnica della Piattaforma è stata operata da **INKODE SOC. COOP**. Successivamente è stata ulteriormente sviluppata tramite una manutenzione evolutiva da parte di **Geobeyond Srl**.

Lo sviluppo della Piattaforma è stata possibile grazie ai finanziamenti **PNRR-PNC** 2021 e 2023, programma “Salute, ambiente, biodiversità e clima”.

Si ringrazia il Gruppo di Lavoro sul Clima Regionale e il Gruppo di Lavoro sui Modelli Accoppiati del Programma Mondiale di Ricerca sul Clima (WCRP), ex organo di coordinamento di **CORDEX** e responsabile per CMIP5.

Si ringraziano i gruppi di modellazione del clima – Climate Limited-area Modelling Community, Royal Netherlands Meteorological Institute, Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Rossby Centre, Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Climate Service Center, Max Planck Institute for Meteorology – che hanno sviluppato e messo a disposizione le simulazioni modellistiche.

Si ringrazia l'infrastruttura della Earth System Grid Federation (ESGF), uno sforzo internazionale guidato dal Programma per la Diagnosi e l'Interconfronto

dei Modelli Climatici del Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti, il Network Europeo per i Modelli del Sistema Terra e gli altri partner dell'Organizzazione Globale per i Portali della Scienza del Sistema Terra (GO-ESSP).

Si ringrazia il progetto **ArCIS** per le elaborazioni di precipitazione da stazione sviluppate e messe a disposizione.

Si ringrazia **Aeronautica Militare** - Servizio Meteorologico per la fornitura di dati da stazione.

Si ringrazia il prof. Piero Lionello, Università del Salento e dott. Filippo Giorgi, Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, per la collaborazione scientifica, rispettivamente, con Arpav e Arpa FVG.

Si ringrazia il progetto Interreg Italia-Croazia **Adriaclim** Climate change information, monitoring and management tools for adaptation strategies in Adriatic coastal areas (<https://www.italy-croatia.eu/web/adriaclim>), grazie al quale è stato sviluppato il data-server che gestisce e rende disponibili tutte le elaborazioni presenti in questa Piattaforma.