

ALMA MATER STUDIORUM UNIVERSITA' DI BOLOGNA

Dipartimento di Scienze Biologiche, Geologiche e Ambientali

Corso di laurea triennale in Scienze Ambientali

Temperature massime giornaliere e ondate di calore:
valutazione delle prestazioni dei modelli climatici sul
periodo storico e proiezioni future

Tesi di laurea in

Struttura e Dinamica dell'Atmosfera e dell'Oceano

Relatore

Prof.ssa Nadia Pinardi

Presentata da

Diego Donato

Correlatore

Dott. Enrico Scoccimarro

Sessione Unica Anno Accademico 2021/2022

SOMMARIO

ABSTRACT	4
1 INTRODUZIONE	5
1.1 Gli eventi estremi di temperatura.....	6
1.2 Gli Impatti degli eventi estremi di temperatura	12
1.3 Il ruolo dei gas serra nella modulazione degli eventi estremi di temperatura.	14
1.4 Il ruolo dei modelli nello studio degli estremi di temperatura.	17
2 DATI E METODI.....	20
2.1 Modelli numerici e reanalisi	20
2.2 Gli scenari emissivi.....	25
2.3 Metodi di analisi	26
3 RISULTATI.....	29
3.1 Rappresentazione delle temperature massime giornaliere sul periodo storico.....	29
3.2 Proiezioni future delle temperature massime giornaliere.....	35
3.3 Rappresentazione delle ondate di calore sul periodo storico	39
3.4 Proiezioni future delle ondate di calore	43
4 DISCUSSIONE E CONCLUSIONI	54
SITOGRAFIA E BIBLIOGRAFIA	57
APPENDICE A	59
APPENDICE B.....	64
RINGRAZIAMENTI.....	65

ABSTRACT

Il presente lavoro ha come obiettivo l'analisi su scala globale del potenziale cambiamento relativo a temperature massime e ondate di calore (aumento numero giorni di ondata di calore l'anno) alla fine del secolo (2066-2100) seguendo lo scenario ssp5-8.5, rispetto ad un definito periodo storico che copre 35 anni (1980-2014).

A tale fine sono state considerate le serie temporali della temperatura massima giornaliera (tasmax) su scala globale per tre diversi Modelli di Circolazione Globale (GCM) del Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) sul periodo storico 1980-2014. Successivamente è stato effettuato il calcolo di un indice di ondata di calore (HWDI, heat wave duration index), partendo dalle tasmax.

Viene presentata una panoramica di come i modelli simulano le temperature massime e l'indice HWDI (numero di giorni di ondate di calore l'anno), accompagnata da una valutazione degli stessi, effettuata confrontando i risultati delle simulazioni (ensemble e singoli modelli) con i risultati della reanalisi ERA5 per il periodo storico. Emergono così differenti performance dei modelli nella rappresentazione delle temperature massime e dell'HWDI: ad esempio il CMCC-ESM2 sembrerebbe mostrare le prestazioni migliori sia rispetto agli altri modelli, che all'ensemble, mentre BCC-CSM2-MR risulta avere le prestazioni peggiori, anche se bisogna considerare una certa variabilità spaziale.

Infine, vengono descritte le proiezioni future dei tre singoli modelli e della media di ensemble sia per le temperature massime, che per l'indice HWDI e per quest'ultimo vengono utilizzate 2 soglie differenti (90°percentile calcolato sulla base delle tasmax del periodo futuro e del periodo storico). Emergono anche in questo caso differenze sia tra i vari modelli, che tra questi e la media di ensemble, con un incremento relativo alle temperature massime e del numero di giorni di ondata di calore l'anno a fine secolo, che risulta maggiore per il CMCC-ESM2 rispetto gli altri modelli.

1 INTRODUZIONE

Quanto il riscaldamento globale incida sugli eventi estremi (tra cui anche quelli di temperatura) sta diventando sempre più importante relativamente al dibattito sul cambiamento climatico. Molti studi, infatti, basati sull'analisi di proiezioni da parte di modelli (globali e regionali), dimostrano che la frequenza e l'intensità degli eventi meteorologici pericolosi aumenteranno in condizioni di riscaldamento globale {es. Batibenz et al. 2020; Forzieri 2014, 2016a, b, 2017, 2018, 2019; Russo et al. 2014, 2017; Giorgi et al. 2011; Schwingshackl et al. 2021, E. Coppola, 2019}

Sulla base degli studi degli ultimi decenni, quindi, appare sempre più chiara, a livello globale, la correlazione tra riscaldamento ed eventi estremi di temperatura.

Considerando che le temperature estreme e ondate di calore hanno un impatto abbastanza importante su salute, economia (ad esempio il settore agroalimentare) e società, è necessario prevederne l'evoluzione nel futuro attraverso proiezioni modellistiche basate su ben precisi scenari emissivi. Ciò, tuttavia, richiede preliminarmente una valutazione dell'efficacia e dell'adeguatezza dei modelli climatici ai fini della riproduzione delle statistiche storiche di tali eventi.

Lo studio presentato, inerente a tale questione, è effettuato in collaborazione con il CMCC, in particolare la Divisione CSP, che contribuisce allo sviluppo dei modelli climatici e del sistema Terra, che utilizza per esplorare i meccanismi che governano la variabilità del clima e approfondirne la comprensione, la sua predicibilità e i suoi cambiamenti, per mezzo di simulazioni numeriche.

In collaborazione con l'Ocean modeling and Data Assimilation (Divisione ODA), che invece si concentra sullo sviluppo e la validazione di modelli di circolazione oceanica e biogeochimici dalle scale globali alle regionali (Mar Mediterraneo e Mar Nero), CSP produce le proiezioni di cambiamento climatico, contribuendo al Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) del World Climate Research Programme (WCRP) ed in supporto al Panel Intergovernativo sui Cambiamenti Climatici (IPCC) ed alle emergenti attività di servizi climatici{<https://www.cmcc.it/it/research/divisioni-di-ricerca/climate-simulations-and-predictions>}.

1.1 GLI EVENTI ESTREMI DI TEMPERATURA

Per la descrizione degli estremi di temperatura (ed eventi associati quali ondate di calore) viene utilizzata una serie di indici, come quelli dell'Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI), gruppo di esperti internazionale che si occupa, attraverso l'individuazione di specifici indici, di misurare e caratterizzare la variabilità climatica, al fine di studiare il cambiamento climatico, confrontando dati dei modelli con quelli di osservazioni o reanalisi (come nel caso di tale studio, ERA5) e il cui obiettivo è quello di definire una metodologia comune per la valutazione delle variazioni degli estremi climatici e di rendere confrontabili i risultati ottenuti in diverse parti del mondo {G. Fioravanti et al., ISPRA, 2013; etcddi.pacificclimate.org}

Si hanno indici degli estremi di temperatura differenti definiti, ad esempio, da un valore fisso come: il numero di giorni con gelo (FD0), il numero di giorni senza disgelo (ID0), il numero di giorni estivi (SU25) e il numero di notti tropicali (TR20). Si hanno anche indici assoluti che rappresentano il più alto e il più basso valore registrato nel corso di un mese o di un anno, ad esempio il valore massimo delle temperature massime giornaliere (TXx), il valore minimo delle temperature massime giornaliere (TXn), il valore massimo delle temperature minime giornaliere (TNx) e il valore minimo delle temperature minime giornaliere (TNn). Si hanno anche indici percentili come le notti fredde (TN10P), le notti calde (TN90P), i giorni freddi (TX10P) e i giorni caldi (TX90P), cioè la percentuale di giorni dell'anno inferiori alla soglia del 10° percentile (TN10P e TX10P) o superiori al 90° percentile (TN90P e TX90P), e gli indici di durata che invece identificano periodi prolungati e intensi di caldo (WSDI e HWDI) o di freddo (CSDI). {Alexander et al., 2006; S. A. Perkins, 2015; G. Fioravanti et al., ISPRA, 2013}.

Il Sixth Assessment Report dell'IPCC (AR6, IPCC, 2021) evidenzia come i cambiamenti negli estremi di temperatura superficiale siano maggiori delle variazioni della temperatura superficiale media a livello globale; il riscaldamento, inoltre, risulta più intenso a livello delle terre emerse rispetto agli oceani, poiché bisogna considerare che la terraferma si riscalda maggiormente rispetto alla superficie degli oceani (in ragione della loro maggiore inerzia termica).

Nel dettaglio, considerando il periodo di riferimento 1960-2018 e la media delle massime temperature annuali tra le temperature massime giornaliere (TXx), il riscaldamento di queste sulla terraferma è il 45% più elevato del riscaldamento a livello globale (considerando anche gli oceani). Il riscaldamento della media delle minime temperature annuali tra le temperature minime giornaliere (TNn) sulla terraferma è ancora più elevato, circa 3°C di riscaldamento dal 1960.

Emerge infatti, dall'analisi di vari set di dati osservazioni, che gli estremi legati alle temperature minime giornaliere cambiano più velocemente di quelli che riguardano le temperature massime giornaliere {Dunn et al., 2020}.

Già il precedente report dell'IPCC (AR5) ha rilevato una diminuzione molto probabile del numero di giorni e notti fredde, al contrario un aumento di giorni e notti calde su scala globale. Altri studi successivi su scala regionale hanno visto tendenze simili, utilizzando diverse metriche basate sulle temperature giornaliere, come gli indici ETCCDI.

Anche successivi dati osservativi mostrano che i cambiamenti rilevati precedentemente verso un riscaldamento globale sono continuati, confermando un aumento dell'intensità e della frequenza degli estremi caldi e al contrario una diminuzione di quelli freddi. Nonostante l'entità delle tendenze osservate negli estremi di temperatura vari a seconda della scala spaziale, temporale e della metrica valutata, anche in considerazione di una certa eterogeneità regionale, le prove di un riscaldamento sono solide e coerenti tra di loro.

Considerando l'ultimo report dell'IPCC (AR6, 2021), si nota un aumento dell'intensità degli estremi di temperatura sia diurne che notturne e del numero di giorni/notte calde (ad esempio misurate con l'indice TX90p, numero di giorni che superano il 90°percentile delle temperature massime giornaliere), e queste variabili sono in qualche modo correlate all'aumento del numero di giorni di ondate di calore (questo dipende dalla metrica utilizzata per misurare le ondate di calore).

Nonostante siano stati individuati aumenti degli estremi di temperatura in relazione al riscaldamento globale, non è spesso possibile collegare tale aumento degli estremi di temperatura direttamente a cambiamenti nelle ondate di calore, poiché nel caso di queste si devono verificare temperature particolarmente elevate (estreme) per più giorni consecutivi.

L'analisi delle ondate di calore e delle sue caratteristiche principali, quindi la frequenza, la durata, la severità (intensità e calore cumulativo) e l'estensione geografica di queste, risulta inoltre complicata considerando che non vi è una definizione precisa in letteratura.

Infatti, i vari studi utilizzano diverse soglie di temperatura e di durata di tali fenomeni (ad esempio nel caso del calcolo dell'indice in questa tesi, HWDI, è stata utilizzata come soglia il 90°percentile delle temperature massime giornaliere e in cui si ha un superamento di questa di 5 gradi per almeno 6 giorni consecutivi).

Benché non ci sia una vera e propria definizione, viene considerata sempre una forma di temperatura giornaliera (minima, massima o media) ed un periodo per cui per più giorni consecutivi (di solito 5 o 6) viene superata una determinata soglia.

Le caratteristiche delle ondate di calore tendono a mostrare una variabilità interannuale data la dipendenza da una serie di condizioni fisiche. Inoltre, il picco di intensità di un'ondata di caldo non è necessariamente il giorno più caldo di un dato anno.

La maggior parte degli eventi di solito dura circa una settimana, tuttavia l'ondata di caldo russa del 2010 è un esempio di un evento raro ed eccezionalmente più lungo della durata di oltre un mese {Matsueda, 2011}.

In generale un'ondata di calore si considera come un periodo di stress termico insolitamente elevato, che provoca modificazioni temporanee degli stili di vita e può avere degli effetti negativi sulla salute della popolazione colpita.

In breve tempo c'è stato un notevole progresso nella comprensione di questo fenomeno, soprattutto per quanto riguarda il modo in cui le ondate di calore vengono misurate, i meccanismi guida di queste, i loro cambiamenti sia osservati che previsti, e l'incidenza dell'influenza antropogenica su questi cambiamenti.

Molti studi prendono in considerazione l'HWDI (Heat Wave Duration Index) relativo ad un periodo maggiore di 5-6 giorni consecutivi in cui la temperatura è maggiore della temperatura massima mediata su un determinato periodo storico o ad un dato percentile calcolato sempre su un determinato periodo storico (quest'ultimo è il caso di tale studio, il cui periodo di riferimento è 1980-2014, mentre nel caso di altri studi, come ad esempio quello di Frich et al., 1961-1990...). Secondo Alexander et al. (2006), quest'indice, in particolare nel caso in cui si considera una soglia assoluta, non può essere applicato a tutte le regioni globali e ciò condiviso anche da altri studiosi che considerano tale indice non efficacemente utilizzabile per i climi caldi con bassa variabilità giornaliera; anche secondo Perkins et al. (2011), ad esempio, tale indice è inadatto per misurare le ondate di calore nei pressi dell'equatore e in alcune regioni tropicali.

Altre sono le definizioni che vengono date alle ondate di calore, come quelle proposte da Meehl e Tebaldi (2004) che utilizzano definizioni basate sulle temperature massime e minime giornaliere per esaminare i cambiamenti previsti nella loro intensità, frequenza e durata nel Nord America e in Europa.

Fischer e Schär (2010) analizzano i cambiamenti in una serie di indici di ondate di caldo in Europa, ad esempio considerando i giorni caldi e le notti fredde combinate tra loro.

Per altri studi invece vengono utilizzate le temperature mensili più che giornaliere, ma considerando i brevi intervalli di tempo in cui si verificano tali fenomeni, usare i dati giornalieri permette di misurarle in modo più appropriato.

Sfortunatamente, per quel che riguarda la temperatura giornaliera, esistono grandi lacune nella copertura e nella qualità della rete di osservazione globale con aree di copertura scarsa o nulla su Africa, America centrale e meridionale, India, Groenlandia o Antartide.

Altri indici sono costruiti tenendo conto di determinati impatti, ad esempio gli effetti sul comfort umano o la salute.

Considerando tre caratteristiche delle ondate di calore: intensità dell'ondata di caldo stagionale, durata e numero di giorni di ondata di caldo {Perkins et al., 2012} emerge che almeno dal 1950, tutte e tre le caratteristiche hanno mostrato tendenze crescenti (considerando dati osservativi) a livello globale (confermato anche da un successivo studio {Perkins et al., 2015}). Anche dallo studio di Frich et al. (2002) si evince una maggiore durata delle ondate di calore durante la seconda metà del '900 in particolar modo in Alaska, Canada, Europa centrale e orientale, Siberia e Australia centrale. Ma si sono verificate ondate di calore più brevi negli Stati Uniti sudorientali, a livello del Canada orientale, in Islanda e nella Cina meridionale. Nonostante ciò, vi è tendenza al rialzo per quel che riguarda la durata delle ondate di calore a livello globale.

È utile capire i fattori guida relativi ai cambiamenti degli eventi estremi di temperatura, ad esempio conoscere cosa influisce sulle caratteristiche delle ondate di calore e sui relativi cambiamenti può aiutare a comprendere come un evento stia cambiando rispetto a delle condizioni naturali di base e ad individuare delle strategie che possano ridurre l'impatto di tali eventi {Stott et al., 2004}.

Dall'AR6 si ha un'ulteriore conferma di come l'aumento delle temperature, sia minime che massime e l'aumento degli eventi caldi (ad esempio ondate di calore) e la diminuzione di quelli freddi (ad esempio ondate di freddo o di gelo), sia influenzato anche da cambiamenti nella circolazione atmosferica su larga scala. Tra questi assumono particolare rilievo le anomalie di alta pressione (circolazione anticiclonica) quasi stazionarie ed eventi di blocco atmosferico (blocking) in varie parti del mondo, oppure cambiamenti a livello delle onde planetarie (onde di Rossby, un tipo di onda su larga scala nei venti atmosferici o nelle correnti oceaniche che si verificano naturalmente a causa della rotazione del pianeta) che in particolare alle medie latitudini influenzano gli estremi di temperatura ed eventi associati come le ondate di calore o ancora cambiamenti a livello dei getti extratropicali o delle medie latitudini {Kai Kornhuber et al., 2020}.

Le ondate di calore, ad esempio, sono spesso associate ad un sistema sinottico di alta pressione (altrimenti noto come anticiclone) e tipicamente a sistemi noti come "blocking high" (Anticiclone di blocco, {Charney e DeVore, 1979; Coughlan, 1983}): un sistema stazionario con un centro di alta pressione anomala che rimane nella stessa posizione per un periodo più lungo del normale. Ad accompagnare tali sistemi c'è il riscaldamento adiabatico associato alle masse d'aria discendenti. Inoltre, i cieli sereni associati al sistema di alta pressione contribuiscono ad un aumento della radiazione in superficie, con conseguente maggiore riscaldamento e condizioni di siccità che possono contribuire ad un'ulteriore amplificazione {Annette L. Hirsch et al., 2021}.

Un ruolo chiave nell'influenzare le ondate di calore è svolto altresì dall'avvezione di calore, determinata sia dalla circolazione atmosferica che dalle condizioni della superficie.

Secondo lo studio di Egger del 1978 e di Pezza et al. del 2012, gli anticicloni di blocco tradizionali si verificano quando i venti atmosferici ad altitudini elevate si dividono a causa dei meandri della corrente a getto, portando una regione ad essere "isolata", di solito per diversi giorni, pertanto l'aria fredda che scende dai poli non può così mescolarsi con l'aria calda delle più basse latitudini e dunque l'aria calda si accumula. Questa situazione atmosferica ha causato numerose ondate di caldo come quella russa del 2010, quella europea del 2003 o quella di Chicago del 1995.

Altri eventi estremi di temperatura sono causati da sistemi di alta pressione che non si originano dalla scissione della corrente a getto, si verificano a latitudini inferiori e rimangono stazionari finché un sistema più forte, di solito di bassa pressione, non lo sposta. Tali sistemi di bassa pressione, ad esempio, sono associati al movimento di perturbazioni relativi all'onda di Rossby (sistemi con minore probabilità di durare molto a lungo). Ci possono essere inoltre configurazioni atmosferiche ad Omega, in cui sistemi di bassa pressione si trovano ai lati di un sistema di alta pressione e lo portano a rimanere stazionario.

Da vari studi {Dole et al., 2011 ; Matsueda, 2011 ; Grumm, 2011}, ad esempio, è emerso che la durata eccezionale dell'ondata di caldo russa del 2010 è stata dovuta principalmente a processi atmosferici che hanno mantenuto un blocco “omega” stazionario per molto tempo, mentre l'intensità elevata è collegata alla precedente siccità.

Vi è infatti una certa influenza anche dell'effetto dei feedback che si generano, ad esempio, tra umidità del suolo, l'evapotraspirazione e la temperatura (in particolare per quel che riguarda le regioni alle medie latitudini e subtropicali) oppure quello tra neve/ghiaccio, albedo e temperatura (in particolare per quanto riguarda le regioni di alta quota e alle alte latitudini), e comunque anche cambiamenti locali, come l'uso del suolo o variazioni nelle concentrazioni di aerosol e copertura vegetale, possono influenzare tale riscaldamento ed eventi associati a questo.

Le retroazioni, frutto delle interazioni terra-atmosfera, infatti, influenzano i cambiamenti relativi agli estremi di temperatura in particolare su scala regionale e locale, ed è proprio per tutti questi diversi fattori che vi è una certa eterogeneità nei cambiamenti regionali degli estremi di temperatura, così come dei relativi livelli di incertezza {Seneviratne et al., 2013; Lemordant et al., 2016; Donat et al., 2017; Sillmann et al., 2017b; Hirsch et al., 2019}.

Retroazioni relative all'interazione tra il livello di umidità del suolo e l'atmosfera hanno influenzato le temperature massime e le ondate di calore in passato, così nel presente, e questo è confermato sia da osservazioni che da simulazioni di modelli climatici.

Tale fenomeno si può notare in modo particolare alle medie latitudini, dove un'umidità del suolo più bassa del normale (condizione di siccità) può portare, attraverso soprattutto l'aumento del flusso di calore sensibile, ad un'amplificazione delle alte temperature {Whan et al., 2015; Douville et al., 2016; Vogel et al., 2017}.

Le condizioni di siccità che precedono l'evento possono contribuire a un'ulteriore amplificazione degli eventi estremi di temperatura a causa dei cambiamenti nel modo in cui il trasferimento di energia dalla superficie all'atmosfera è ripartito tra riscaldamento sensibile e latente {Hirsch et al., 2019; Miralles et al., 2014; Schumacher et al., 2019}. Inoltre, l'avvezione di calore, determinata sia dalla circolazione atmosferica che dalle condizioni della superficie, è un meccanismo critico per le forti ondate di caldo {Schumacher et al., 2019, Hirsch et al., 2021}.

Da altri studi emerge che, prendendo in considerazione il ciclo dell'acqua e la superficie terrestre in Europa durante l'estate, può essere spiegato un aumento delle ondate di calore estive nel continente e si è visto come le ondate di caldo più intense sono molto più probabili dopo un inverno più secco nel Mediterraneo {Vautard et al., 2007; Vautard e Yiou, 2009}.

Analizzando le maggiori ondate di calore, come quella russa del 2010 o quella europea del 2003, sono stati fatti passi avanti nel comprendere il ruolo della superficie terrestre e dei modelli sinottici nell'innescare tali fenomeni. Infatti, un deficit di precipitazioni estremo, un'eccessiva evapotraspirazione e alte pressioni di blocco persistenti hanno portato ad un feedback positivo in cui il raffreddamento latente è stato fortemente ridotto, consentendo all'ondata di caldo del 2003 di essere così estrema.

Inoltre, la diminuzione dell'umidità del suolo ha anche causato un aumento dell'intensità delle ondate di caldo estive nel 1976, 1994 e 2005 {Zaitchik et al., 2006; Fischer et al., 2007}.

A livello regionale ci possono essere delle differenze, ad esempio, dallo studio di Viorica Nagavciuc et al., (2021) emerge che non è stato riscontrato un aumento significativo degli eventi composti (es. estati calde e secche) nel periodo analizzato (1950-2020) per quel che riguarda la Romania.

In generale, però, date le forti interazioni tra le ondate di calore e la superficie terrestre, sarebbe utile anche la ricerca sull'accoppiamento tra ondate di calore e siccità, così come una sovrapposizione di metriche per i due fenomeni.

Il feedback neve/ghiaccio-albedo influenza invece i cambiamenti della temperatura alle alte latitudini e questo può giustificare il più rapido riscaldamento alle medie e alte latitudini dell'emisfero settentrionale {Diro et al., 2018, Gross et al., 2020}.

Considerando forzanti esterni regionali-locali, ad esempio, si rileva come la deforestazione, in alcune regioni delle medie latitudini, abbia contribuito in modo rilevante al riscaldamento che ha portato ad un incremento delle temperature massime. Altri fattori sono da tenere in considerazione, come alcune pratiche agricole che possono portare ad un raffreddamento delle temperature calde estreme (tra cui irrigazione e agricoltura intensiva) o l'isola di calore urbana (UHI, urban heat island) che porta a temperature più elevate nelle aree urbane rispetto alle zone circostanti, contribuendo ad un riscaldamento maggiore in aree a rapida urbanizzazione ed ha una certa influenza soprattutto sulle temperature notturne.

Vari studiosi sottolineano l'importanza di utilizzare metodi climatologici sinottici (considerando la dinamica della circolazione atmosferica su vasta scala) per studiare le ondate di calore. Ad esempio, alcuni studiosi, come nel caso degli studi di Domonkos et al. (2003) sulle ondate di calore a livello dell'Europa centrale e meridionale (sul periodo 1901-1998), hanno adottato un approccio sinottico, collegando i cambiamenti nella frequenza delle ondate di calore alla frequenza delle condizioni anticicloniche.

Nello studio delle temperature estreme e delle ondate di calore emergono vari problemi, ad esempio, mentre le temperature medie sono relativamente facili da ricavare, quelle estreme risultano invece più difficili da ottenere, poiché richiedono dati giornalieri di alta qualità per il loro calcolo, e soprattutto, per quanto riguarda le osservazioni, non esistono dati per tutte le aree del pianeta, inoltre il calcolo stesso spesso risulta poco affidabile. E' altresì evidente che ci sono grandi lacune nella comprensione dei cambiamenti osservati nelle ondate di calore (così come per altri eventi estremi), sia spazialmente che temporalmente.

In determinate parti del mondo, ad esempio, le registrazioni non avvengono poiché le stazioni sono state rimosse per qualche motivo o non funzionanti. Dunque, in molte località i dati potrebbero essere insufficienti, ma il problema può essere in parte risolto attraverso le reanalisi, che aiutano a produrre immagini coerenti dove e quando mancano le osservazioni. La digitalizzazione e il controllo di qualità delle registrazioni aiuterebbe a comprendere come variano i cambiamenti regionali nelle ondate di calore, oltre ad aumentare l'affidabilità riguardo le proiezioni globali. Inoltre, in alcune regioni, data la mancanza di dati di osservazioni, tale analisi può risultare più difficoltosa, mentre in altre dove i dati osservativi sono disponibili e di alta qualità effettuare studi in merito risulta più semplice.

1.2 GLI IMPATTI DEGLI EVENTI ESTREMI DI TEMPERATURA

Associato a temperature estreme sostenute vi è un elevato tasso di morbilità e mortalità umana, intense diminuzioni della produttività sul posto di lavoro, aumento della domanda di elettricità e danni potenzialmente irreversibili agli ecosistemi vitali.

Al contrario di altri eventi estremi, le ondate di calore sono spesso sottovalutate, nonostante siano una delle cause principali di morti correlate a fattori meteo-climatici, inoltre hanno un forte impatto su ampie zone geografiche.

Si pensi all'ondata di calore anomala che ha interessato l'Europa occidentale nell'estate del 2003, che ha causato circa 35000 morti {Schar et al., 2004}, anche se dallo studio di Coumou e Rahmstorf del 2012 vengono associate a tale ondata circa 70000 morti.

Notevole, ad esempio, anche l'ondata di calore che ha colpito l'India del 1998 che ne ha causate circa 15000, come anche quella che colpì la Russia nel 2010 con circa 54000 morti {McMichael and Lindgren, 2011}.

Le prospettive future inoltre non sono così positive, considerando che sotto l'effetto del riscaldamento globale, la vulnerabilità della popolazione alle ondate di calore è destinata ad aumentare, con la crescita della temperatura media globale, con numerose morti correlate a crescenti problemi respiratori e cardiovascolari.

Anche le infrastrutture umane sono condizionate dal verificarsi di tali eventi, ad esempio ondate di caldo verificatesi in Australia hanno portato alla deformazione delle ferrovie, o influenzato negativamente il settore alimentare con conseguenze indirette sulla salute umana.

L'impatto relativo alle ondate di calore, nel caso dello studio di A. Dosio et al., considerando HWMId (altro indice di misura delle ondate di calore, relativo alle intensità di queste) può essere diverso a seconda del luogo in cui si verificano, poiché la vulnerabilità può essere diversa.

Zone in cui gli impatti più importanti sono di tipo ecologico, altri in cui l'impatto è maggiormente correlato alla salute umana e aumento della mortalità. Inoltre, lo stress da calore {Fischer et al., 2012} può essere diverso tra le aree urbane e rurali.

Bisogna, inoltre, considerare gli impatti delle ondate di calore a livello delle regioni tropicali, i cui si trovano la maggior parte dei paesi in via di sviluppo, per cui la rapida crescita della popolazione e la bassa capacità di adattamento rendono queste regioni particolarmente vulnerabili agli impatti di tali fenomeni.

Secondo lo studio di David García-León et al. (2021), il calore estremo mina la capacità lavorativa degli individui, con conseguente riduzione della produttività e quindi della produzione economica. In particolare, tale studio si concentra sui danni economici presenti e futuri dovuti alla ridotta produttività sul lavoro causata dal caldo estremo in Europa, concentrandosi sulle ondate di caldo verificatesi in quattro anni particolarmente caldi (2003, 2010, 2015 e 2018), con confronto dei risultati con il periodo storico 1981–2010.

Negli anni selezionati, il totale dei danni stimati attribuiti alle ondate di caldo è stato pari allo 0,3–0,5% del prodotto interno lordo (PIL) europeo, anche se bisogna considerare una certa eterogeneità spaziale, mostrando impatti sul PIL anche superiori all'1% nelle regioni più vulnerabili.

Le proiezioni future indicano che entro il 2060 gli impatti potrebbero aumentare in Europa di quasi cinque volte rispetto al periodo storico 1981-2010, se non verranno intraprese ulteriori azioni di mitigazione o adattamento, con presenza di effetti più pronunciati nelle regioni in cui tali danni sono già notevoli.

È importante distinguere la durata e l'intensità di un'ondata di calore, entrambi rilevanti per la determinazione delle perdite di produttività. L'intensità, in particolare, risulta fondamentale, poiché gli effetti fisiologici del calore sui lavoratori emergono solitamente al di sopra della soglia WBGT di 26 °C. Altri studi, però, suggeriscono che, in termini di impatto, la durata di un'ondata di calore può risultare più importante {D'Ippoliti et al., 2010}.

Prendendo sempre in considerazione lo studio di David García-León et al. (2021), è emerso che i periodi di caldo estremo in Europa sono stati molto diversi per frequenza, durata, estensione e intensità e i danni regionali (in particolare il calo di produttività e danni economici diretti e indiretti) sono dipesi dall'estensione, dalla durata e dalla magnitudo degli eventi considerati, nonché dalla struttura ecologica regionale. Si osserva per l'Europa un gradiente nord-sud delle perdite economiche, coerentemente con le temperature mediamente più calde e le economie delle regioni dell'Europa meridionale si sono mostrate sempre le più colpite, anche da quando gli eventi di calore si sono intensificati per le regioni settentrionali del continente, con impatti per queste ultime ben al di sopra dei massimi storici {David García-León et al., 2021}.

Inoltre, le alte temperature possono essere dannose per l'agricoltura. La crescita delle piante è influenzata negativamente dalle alte temperature diurne e alcune colture richiedono temperature notturne non particolarmente elevate. Le ondate di calore aumentano anche la possibilità che il bestiame soffra di stress da caldo, soprattutto quando le temperature notturne rimangono elevate. I bovini stressati dal calore possono subire un calo della produzione di latte, una crescita più lenta e tassi di concepimento ridotti.

Uno degli impatti più critici delle ondate di calore è il picco di domanda di elettricità, anche se l'utilizzo di energia rinnovabile e sostenibile aiuta a mitigare questo problema specifico. La progettazione degli edifici dovrebbe prendere in considerazione tali fenomeni, al fine di migliorare la resilienza delle abitazioni.

Nel caso specifico dell'Australia l'impatto significativo delle ondate di calore sull'ambiente naturale e su quello antropico ha acquisito una crescente considerazione da parte dell'opinione pubblica, anche se la ricerca si concentra sempre di più sulla mitigazione degli impatti delle ondate di calore, ma molto meno sull'adattamento {VijayaVenkataRaman et al., 2012}.

Non mancano gli studi sulle ondate di calore che considerano il loro impatto significativo sulla salute umana e sull'ambiente, tuttavia, ci sono pochissimi studi che si concentrano sugli effetti di queste e dei meccanismi per mitigarli {JianZuo et al., 2015}.

Possono essere utilizzati vari indicatori e indici delle ondate di calore per misurare un livello di rischio o di esposizione per un particolare settore (ad esempio, salute, infrastrutture, ecc.). Attualmente, molti di questi rilevano tali impatti sulla salute umana, meno ricerche sono state, invece, condotte per quantificare l'impatto sulle aree non sanitarie, in particolare sulle infrastrutture (elettriche, di trasporto, stradali, ecc.) e sull'agricoltura {Benjamin Disher et al., 2021}.

Le ondate di caldo e la siccità rientrano nella categoria dei rischi legati al clima che incidono sempre più frequentemente sull'attività socioeconomica, con ripercussioni spesso gravi sull'uomo e sull'ambiente (IPCC, 2021). Considerando il loro effetto combinato (estremi relativi sia a temperature elevate, sia a condizioni secche) queste possono avere conseguenze ancora più disastrose per società, economia ed ecosistemi (ad esempio possono a loro volta creare condizioni di incendio). È anche per tali impatti che lo studio congiunto delle ondate di caldo e della siccità e l'analisi dei modelli di circolazione su larga scala, che favoriscono il loro verificarsi, sono di crescente interesse {Feng et al., 2020; Geirinhas et al., 2021; Ionita et al., 2021a; Kong et al., 2020; Russo et al., 2019, Viorica Nagavciuc et al., 2021}.

1.3 IL RUOLO DEI GAS SERRA NELLA MODULAZIONE DEGLI EVENTI ESTREMI DI TEMPERATURA.

Dallo Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation (SREX, IPCC, 2012) emerge che le influenze antropiche, probabilmente, abbiano portato al riscaldamento delle temperature minime e massime estreme su scala globale e anche dal successivo Fifth Assessment Report (AR5, IPCC, 2014) si rileva come l'influenza umana abbia contribuito ai cambiamenti nell'intensità e frequenza delle temperature estreme osservate su scala globale nella seconda metà del XX secolo, così come a livello regionale e locale oltre ad un aumento della frequenza delle ondate di calore in alcune località.

Dall'AR6 emergono conclusioni analoghe, in relazione ad un aumento della frequenza e intensità degli estremi caldi, così come alla diminuzione di frequenza e intensità di quelli freddi, sotto l'influenza delle emissioni antropogeniche di gas serra, su scala globale e regionale.

Inoltre, già dal SREX e dall'AR5, ma anche dal più recente report dell'IPCC (AR6) si evince che i gas serra sono il fattore dominante (forzante) per quanto riguarda l'aumento della frequenza, dell'intensità e della durata degli eventi correlati agli estremi di temperatura caldi, così come la diminuzione degli eventi correlati agli estremi di temperatura freddi {IPCC, AR6, WGI, Chapter11}.

Proiezioni recenti che considerano le emissioni di gas a effetto serra vedono aumentare in modo significativo la frequenza, l'intensità e la durata delle ondate di calore, con il rischio di impatti più importanti. Emergono anche altri risvolti, come che nella maggior parte delle regioni del mondo il giorno più caldo su un periodo di 20 anni rischia di diventare il giorno più caldo su un periodo di 2 anni a causa dei cambiamenti climatici. Vari studi suggeriscono, però, che anche in condizioni di riduzione delle emissioni di gas serra, la frequenza, l'intensità e la durata di questi eventi di calore è destinata a peggiorare nei prossimi decenni, con aumento di disastri naturali e relativi impatti sulla popolazione. {Benjamin Disher et al., 2021}

L'aumento delle concentrazioni ed emissioni di gas serra può avere vari effetti diversi (anche indiretti), come quello dell'aumento della concentrazione di CO₂, che incide sulle temperature terrestri attraverso una minore traspirazione delle piante e l'aumento della resistenza degli stomi, portando ad un maggiore riscaldamento della terraferma dovuto alla riduzione del raffreddamento da evaporazione {Lemordant et al., 2016; Vicente-Serrano et al., 2020b}.

Con lo studio di Ting Hu et al. , 2020 viene presa in esame l'influenza di determinati fattori (forzanti) sugli estremi di temperatura: i gas serra (GHG), l'aerosol antropogenico (AA) e i forzanti naturali esterni (NAT). Emerge che la simulazione della media di ensemble dei modelli selezionati (simulazioni di 5 modelli considerando il periodo storico 1951-2018), relativamente alle tendenze degli estremi di temperatura, considerando i tre forzanti, concorda bene con le osservazioni per la maggior parte delle regioni prese in esame.

Se si considera il singolo forzante dei GHG si notano variazioni di maggiore entità, indicando un riscaldamento più intenso dovuto ai gas serra.

L'effetto dei NAT (tra cui variazioni dell'irraggiamento solare e dell'attività vulcanica) è trascurabile nella maggior parte delle aree terrestri, pertanto, influenza l'andamento delle temperature in maniera nettamente inferiore. L'effetto dei GHG sul riscaldamento degli estremi di temperatura è parzialmente compensato dall'effetto di raffreddamento di AA, ma la ridotta influenza di questi sulle temperature fa emergere l'effetto riscaldante dei gas serra. Gli effetti combinati di entrambi spiegano la maggior parte dei cambiamenti osservati delle temperature estreme a livello globale e regionale. Emerge così che tali cambiamenti non possono essere spiegati senza il forzante GHG.

Si stima che il forzante dei gas serra da solo abbia aumentato l'indice TX90p (uno degli indici relativo agli estremi caldi) dell'11,2% su scala globale (intervallo di confidenza del 90%: 9%-13%), e che questo sia stato compensato dal 2,5% (1%-4%) dall'effetto di raffreddamento dell'AA e dallo 0,2% (0%-0,3%) dal forzante NAT. Anche per gli estremi freddi, la diminuzione attribuibile al forzante dei gas serra è significativa, mentre quelle dovute ai forzanti AA e NAT non lo sono.

Si è visto come l'incidenza del forzante antropogenico (ANT, stimato come la differenza tra come un modello risponde a tutti e tre i forzanti e alla variabilità interna) risulta piuttosto importante {Ting Hu et al., 2020}.

L'ondata di calore russa del 2010 rappresenta un caso particolare, infatti da vari studi, tra cui quello di Dole et al. (2011), che utilizza un insieme CMIP3, è emerso, che il contributo antropogenico non ha particolarmente influenzato l'intensità di tale ondata di calore, ma i principali responsabili di tale evento sono risultati i meccanismi atmosferici e i feedback scaturiti dalla interazione terra-atmosfera. Anche lo studio di Otto et al. (2012) evidenzia che l'entità dell'ondata di calore russa del 2010 è stata principalmente guidata da dinamiche atmosferiche interne, ma che un simile evento (piuttosto raro) si verifichi nella stessa

regione risulta più probabile tenendo conto del cambiamento climatico antropogenico {Rahmstorf e Coumou, 2011; Otto et al., 2012}.

Come per l'aumento della temperatura media, anche l'aumento delle temperature estreme è dovuto principalmente al forzante dei gas serra, in parte compensato dal forzante degli aerosol (che influiscono sulle temperature in misura minore) {IPCC, AR6, WGI, Chapter11}.

In generale da vari studi emerge che i cambiamenti relativi al numero di notti calde, giorni caldi, notti fredde e giorni freddi e altri indicatori come il Warm Spell Duration Index (WSDI) sono attribuiti all'influenza antropica {Christidis e Stott, 2016; Hu et al., 2020}. Ciò viene confermato anche da studi regionali, ad esempio per l' Asia {Dong et al., 2018; Lu et al., 2018}, Australia {Alexander e Arblaster, 2017} e per l'Europa {Christidis e Stott, 2016}, per cui sono stati trovati risultati simili.

Nonostante vari studi abbiano individuato l'aumento di diverse metriche relative alle ondate di calore, come la durata di queste o il numero di giorni di ondata di calore in regioni diverse, pochi studi recenti hanno attribuito tale aumento a cause specifiche (come l'influenza antropica), ma con una certa coerenza si è visto come l'influenza antropogenica appaia fondamentale.

Inoltre, è stato notato come i cambiamenti relativi sia agli estremi freddi (diminuzione), sia agli estremi caldi (aumento) attribuibili a fattori antropogenici siano maggiori nelle aree terrestri dell'emisfero settentrionale {Shiogama et al., 2016}.

Sono stati effettuati molti studi che hanno esaminato le temperature estreme di breve durata, tra cui le temperature giornaliere, gli indici di temperatura e le metriche delle ondate di calore. Considerando eventi recenti dal 2016 in poi si è notato che la probabilità di accadimento di tali eventi è prossima allo zero nelle simulazioni dei modelli senza influenze antropiche {Herring et al., 2018, 2019, 2020; Imada et al., 2019; Vogel et al., 2019}, dunque, risulta meno probabile che questi eventi si verificano senza considerare l'influenza umana.

Così come si è visto che gli eventi associati a temperature fredde estreme osservate, mostrano che l'influenza umana riduce la probabilità di tali eventi e questo viene confermato da vari studi regionali {Peterson et al., 2012, Trenary et al., 2015, 2016; Wolter et al., 2015; Bellprat et al., 2016, Christidis et al., 2014, Qian et al., 2018; Y. Sun et al., 2018b}. Costituisce un'eccezione lo studio di Grose et al. (2018), che ha riscontrato un aumento della probabilità di gelate importanti nell'Australia occidentale nel 2016 a causa dell'influenza antropica.

L'effetto di tale influenza varia da regione a regione, incidendo sui cambiamenti della circolazione atmosferica, sulle retroazioni terra-atmosfera o prendendo in considerazione altri fattori come la concentrazione di aerosol. Inoltre, forzanti locali possono mascherare o potenziare l'effetto dei gas serra (riscaldamento), ad esempio in India gli aerosol o l'irrigazione possono mascherare l'effetto di questi {Wehner et al., 2018c}.

Infatti, altri studi confermano che i cambiamenti nelle concentrazioni di aerosol hanno influenzato le tendenze relative alle temperature calde estreme in alcune regioni, con un minore riscaldamento tra il 1950 e

il 1980. Inoltre, l'agricoltura intensiva e l'irrigazione hanno attenuato ad esempio l'aumento delle temperature estreme estive nel Nord America centrale.

Gli aumenti previsti delle ondate di caldo in futuro dipendono dallo scenario emissivo, con i cambiamenti più importanti secondo lo scenario "business as usual" (RCP8.5). Questi prendono in considerazione in primis l'effetto delle emissioni e delle concentrazioni dei gas serra (e come evolvono nel tempo) e lo scenario RCP8.5 in particolare considera le emissioni e le concentrazioni di gas serra più elevate (rapido aumento nel corso del tempo).

1.4 IL RUOLO DEI MODELLI NELLO STUDIO DEGLI ESTREMI DI TEMPERATURA.

Un importante strumento nello studio degli estremi di temperatura sono i modelli climatici.

Sebbene questi siano i migliori strumenti disponibili per comprendere come cambierà il clima, anche in presenza di una maggiore attività antropogenica, ad esempio come le ondate di calore e altri eventi climatici estremi possono evolversi con il cambiamento climatico, è necessario capire se i modelli climatici siano in grado di riprodurre adeguatamente le statistiche storiche di questi eventi.

Ci possono essere fattori che influenzano la rappresentazione delle ondate di calore e temperature estreme, poiché i processi guida di queste (flussi di energia superficiale, umidità del suolo e sistemi sinottici) potrebbero non essere adeguatamente simulati.

I modelli climatici globali (GCM) sono uno strumento importante per comprendere i cambiamenti passati, presenti e futuri nel sistema climatico globale. Attraverso fasi successive del Coupled Model Intercomparison Project (CMIP), i GCM sono avanzati nella loro complessità per migliorare la rappresentazione dei processi fisici, con un aumento della loro risoluzione {Eyring et al., 2016}.

Già tra i modelli Coupled Model Intercomparison Project Phase 3 (CMIP3) e Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) ci sono stati dei miglioramenti nella simulazione dei processi chiave delle temperature estreme e ondate di calore, ancor di più considerando i modelli Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6).

Anche se, dalla valutazione dei modelli globali CMIP6 relativamente alle caratteristiche delle ondate di calore tra il 1950 e il 2014, accompagnata da una valutazione delle ondate di calore dei modelli globali CMIP5, emerge che entrambi gli ensembles sottostimino la frequenza media dell'ondata di calore, con bias dipendenti dalla regione per la durata dell'ondata di calore, l'intensità e il calore cumulativo. Inoltre, confrontando i modelli CMIP5 e CMIP6 emerge che i miglioramenti nelle prestazioni per le metriche delle ondate di calore valutate sono marginali, suggerendo che futuri miglioramenti nella simulazione di questi fenomeni potrebbero essere possibili solo con progressi significativi nelle capacità di modellazione climatica {Annette L. Hirsch et al., 2021}.

Anche da altri studi emerge che dall'analisi delle simulazioni CMIP6 {H. Chen et al., 2020; Di Luca et al., 2020a; Kim et al., 2020; Thorarinsdottir et al., 2020; Wehner et al., 2020; Li et al., 2021}, i modelli CMIP6 hanno prestazioni simili a quelle dei modelli CMIP5 per quanto riguarda i bias negli estremi di caldo e freddo. Secondo Kim et al. (2020) sono stati notati cambiamenti marginali nelle abilità tra CMIP5 e CMIP6 per una serie di condizioni climatiche estreme, dunque i miglioramenti delle prestazioni nel rappresentare alcuni estremi climatici richiede più di un semplice aumento della risoluzione per considerare i processi alla base degli estremi di temperatura, comprese le ondate di caldo.

Anche molti modelli climatici regionali (RCM) sono stati valutati per quel che riguarda la simulazione delle temperature estreme in varie regioni e rispetto ai GCM questi sembrano meglio simulare le temperature estreme, grazie ad una maggiore risoluzione, anche se bisogna considerare la complessità topografica e i diversi parametri utilizzati. C'è una serie di fattori però da tenere in considerazione, ad esempio l'ensemble di modelli europeo CORDEX nelle proiezioni utilizza diverse climatologie di aerosol {Bartók et al., 2017; Lorenz et al., 2019} o a livello della superficie terrestre non vengono tenuti in considerazione gli effetti della CO₂ sulla fotosintesi, che portano ad una diminuzione dell'evapotraspirazione, questo genera dei bias nella rappresentazione delle temperature estreme in tali proiezioni {Boè et al., 2020}.

In generale modelli climatici terrestri (ESM) non considerano bene, o affatto, alcuni forzanti terrestri, infatti la capacità da parte dei modelli climatici di rappresentare le retroazioni terra-atmosfera è una delle cause che porta all'emergere di discrepanze (bias) tra osservazioni/reanalisi e simulazioni modellistiche. {Clark et al., 2006; Mueller e Seneviratne, 2014; Meehl et al., 2016}. Inoltre, per la maggior parte dei modelli CMIP5 e CMIP6, alcune pratiche agricole tra cui l'irrigazione e l'intensificazione delle colture o l'isola di calore urbana (UHI, urban heat island) non sono tenuti in considerazione. Vi è elevata coerenza sul fatto che la deforestazione nelle zone temperate porti ad un riscaldamento invernale e che tale fattore abbia influenzato il riscaldamento delle temperature estreme alle medie latitudini settentrionali nel corso del XX secolo e inizio del XXI secolo. Tuttavia, molti modelli non rappresentano bene gli effetti delle foreste sul ciclo stagionale e diurno della temperatura, al contrario delle osservazioni che invece mostrano come durante il giorno la copertura forestale porti ad un certo raffreddamento rispetto a zone in cui questa è assente {Li et al., 2015} e ciò avviene più che altro nelle zone temperate, aride e tropicali {Alkama e Cescatti, 2016}.

Inoltre, la capacità dei modelli di catturare le tendenze osservate nelle temperature estreme dipende dalla metrica considerata, dal modo in cui gli indici sono calcolati e dalle scale temporali e spaziali {IPCC, AR6, WGI, Chapter11}.

I modelli diventano ancora più fondamentali per quel che riguarda le proiezioni future e utilizzandoli sono stati fatti vari studi in merito a temperature estreme e ondate di calore, come nel caso di uno studio di Alessandro Dosio et al., 2018 nel quale emerge, che con un riscaldamento di 1,5°C, si prevede un aumento significativo dell'entità delle ondate di calore in Africa, Sud America e Sud Est asiatico e la frequenza di tali fenomeni raddoppierebbe in gran parte del pianeta. Circa il 13,8% della popolazione mondiale sarà esposto a forti ondate di calore almeno ogni 5 anni. Una frazione che diventa quasi 3 volte più grande (36,9%) con un

riscaldamento di 2°C. Se tale riscaldamento fosse limitato ad 1,5°C, ci sarebbero circa 420 milioni di persone in meno esposte ad ondate di calore estreme e circa 65 milioni di persone in meno esposte ad ondate di calore eccezionali.

Tale studio ha avuto lo scopo di individuare quelle regioni in cui limitare il riscaldamento a 1,5°C avrebbe maggiori vantaggi nel ridurre l'esposizione della popolazione al caldo estremo, e come nello studio presentato in questa tesi, venga valutata la capacità di un modello di simulare le temperature estreme, considerando sempre un determinato periodo storico (nel caso dello studio sopra 1979-2005). Per valutare i modelli, i dati della temperatura massima (in questo caso annuale) vengono confrontati con due dataset di reanalisi globale. In conclusione, le simulazioni dei modelli catturano in modo soddisfacente la variabilità temporale e geografica delle temperature estreme osservate con bias inferiori rispetto ad altri studi, ad esempio quello di Sillmann et al. (2013a), per l'intero ensemble CMIP5.

Le proiezioni future presentate nello studio di Alessandro Dosio et al. (2021), mostrano un aumento significativo delle temperature massime annuali sulla maggior parte del pianeta, tuttavia esistono variazioni regionali molto ampie. Inoltre, in condizioni di riscaldamento moderato (1,5°C), si prevede un aumento significativo dell'intensità delle ondate di calore su gran parte del globo, in particolare su Africa, America centrale e meridionale e Sud-est asiatico. Con un riscaldamento di 2°C, la maggior parte dei paesi tropicali dovrà affrontare forti ondate di calore almeno una volta ogni cinque anni e ondate di calore estreme almeno una volta ogni 20 anni, con una riduzione di oltre il 60% del periodo di ritorno delle ondate di caldo estremo sulla maggior parte dei paesi tropicali, Stati Uniti continentali e paesi mediterranei.

I risultati di tale studio concordano con altri {Russo et al., 2017 ; Mora et al., 2017}, che prevedono un aumento del rischio di temperature estreme, soprattutto nelle aree tropicali.

Tuttavia, in alcune regioni (es. nord Europa) i modelli tendono a sovrastimare l'estensione geografica delle ondate di calore {Vautard et al., 2013 ; Alessandro Dosio et al., 2021}.

Altri studi hanno mostrato che una sovrastima delle temperature estreme giornaliere in CMIP5 è dovuta principalmente ai feedback terra-atmosfera, che può essere causata da incertezze relative ai dati osservativi {Sippe et al., 2017 }.

Perkins-Kirkpatrick e Lewis (2020), invece, raccomandano di utilizzare più decenni per valutare le tendenze regionali nelle caratteristiche delle ondate di caldo per tenere adeguatamente conto dell'influenza della variabilità interna.

Inoltre, quando i modelli simulano condizioni di ondata di calore che possono persistere più a lungo di quanto osservato, questo può essere associato a limitazioni da parte dei modelli nel simulare fenomeni meteorologici sinottici e processi che contribuiscono sia all'accumulo che alla dissipazione del calore {Hirsch et al., 2021}.

Davini e D'Andrea (2020) invece esaminano le condizioni di blocco di alta pressione, sia per i modelli CMIP5 che CMIP6, mostrando una sottostima nella frequenza di condizioni di blocco cui consegue l'emergere di bias negativi in determinate zone {Hirsch et al., 2021}.

Le stime riguardo al bias nella simulazione di vari indici di temperature estreme, considerando i modelli CMIP6, mostrano che l'ensemble multi-modello sembra avere prestazioni migliori dei singoli modelli grazie alla riduzione di bias sistematici {Kim et al. , 2020}. Un ensemble è comunque sensibile ai membri costituenti, ma con un'attenta selezione di modelli (sottoinsieme di modelli selezionati) ne consegue una maggiore prestazione rispetto all'intero insieme CMIP {Herger, Abramowitz, et al., 2018; Herger, Angelil, et al., 2018}. Schaller et al. (2018) dimostrano che l'uso di grandi insiemi di modelli piuttosto che di singole realizzazioni è necessario per simulare al meglio le ondate di caldo {Hirsch et al. 2021}.

2 DATI E METODI

Per tale studio sono stati prelevati dati Network Common Data Form (NetCDF, formato di file per la memorizzazione di dati scientifici multidimensionali, variabili come temperatura, umidità, pressione, velocità del vento e direzione) per le temperature massime giornaliere (tasmax-2m, climatologia dell'indice HWDI e cioè la variabile alla base di tale indice) a livello globale per il periodo storico 1980-2014 per tre modelli General Circulation Model (GCM) CMIP6: BCC-CSM2-MR, CMCC-ESM2, INM-CM5-0. Tali dati sono scaricati attraverso la piattaforma Earth System Grid Federation (ESGF)

Sono stati prelevati dati delle temperature massime giornaliere a livello globale anche per la reanalisi ERA5 dal database di Copernicus (il programma di osservazione della Terra dell'Unione Europea, che offre servizi di informazione, mettendo a disposizione dati satellitari e in situ di osservazione del sistema Terra).

Per lo studio presentato in questa tesi, quindi, sono stati utilizzati dati relativi alla medesima variabile sia per modelli che per una reanalisi, allo scopo di effettuare una valutazione delle prestazioni dei tre modelli climatici considerati per confronto con il dataset di reanalisi.

2.1 MODELLI NUMERICI E REANALISI

Una reanalisi climatica è uno strumento che fornisce una descrizione numerica del clima recente, prodotta combinando modelli con osservazioni e fornendo così il quadro più completo attualmente possibile del clima passato, colmando eventuali lacune osservative. Infatti, le osservazioni sono sempre state distribuite in modo non uniforme e sono accompagnate da errori, dovuti alla mancanza o alla disattivazione temporanea di stazioni climatiche in determinate zone, soprattutto isolate o disabitate, o ad errori tecnici.

Anche con l'introduzione dell'uso dei satelliti, le osservazioni da sole non possono fornire un quadro completo e accurato dello stato del sistema terrestre in tutto il mondo in un dato momento.

Le reanalisi, colmando le lacune nella registrazione (record) dei dati di osservazione e facendolo in modo coerente nel tempo, riducono al minimo eventuali segnali spuria legati al cambiamento di determinate

variabili. Queste possono contenere stime di parametri atmosferici e di superficie terrestre come temperatura dell'aria, pressione e vento a diverse altitudini, precipitazioni, contenuto di umidità del suolo, altezza delle onde oceaniche e temperatura della superficie del mare.

Le reanalisi in genere hanno una buona copertura spaziale e temporale, utile per comprendere il cambiamento climatico e le condizioni meteorologiche estreme attuali.

Prima della produzione di una nuova reanalisi, si lavora per migliorare la qualità e la disponibilità dei dati osservativi passati, ad esempio digitalizzando i vecchi record e rielaborando i record satellitari esistenti. Man mano che vengono prodotte le reanalisi viene effettuato un controllo di qualità di dati osservativi e la loro affidabilità viene valutata rispetto ad altre prodotte presso altri istituti.

Nel dettaglio ERA5, la reanalisi considerata per lo studio presentato in questa tesi, fornisce dati dalla superficie terrestre alla parte superiore dell'atmosfera, per variabili come temperatura dell'aria, vento, precipitazioni, temperatura della superficie del mare e altezza delle onde oceaniche e fornisce anche informazioni sull'incertezza: è probabile, infatti, che i dati provenienti da aree o periodi in cui le osservazioni sono più scarse siano meno certi.

La copertura spaziale dei dati è su una griglia terrestre di 30 km (elevata risoluzione orizzontale, contro gli 80km di ERA-interim, versione precedente della reanalisi operativa fino al 31 agosto 2019). Questa inoltre combina grandi quantità di osservazioni storiche con stime globali utilizzando modelli avanzati e sistemi di assimilazione dei dati.

Per tale studio sono stati presi in considerazione i modelli di circolazione generale GCM, che si basano su una rappresentazione del sistema terra suddiviso in migliaia di celle tridimensionali e ogni cella è rappresentata da equazioni matematiche che descrivono come l'energia e la materia si muovono attraverso di essa (variazione nel tempo) sulla base di leggi fisiche fondamentali, del moto dei fluidi e della chimica.

Per eseguire le simulazioni dei modelli climatici sono necessari computer con grande capacità di calcolo, previa impostazione delle variabili che rappresentano le condizioni iniziali.

Si verifica il passaggio dei risultati da una cella a quella adiacente con successiva risoluzione delle equazioni e avviene la ripetizione del processo attraverso timestep (passaggi temporali) successivi.

Ogni modello ha la propria risoluzione relativa alla grandezza delle celle della griglia e al loro numero: maggiore risoluzione significa un numero maggiore di celle della griglia e celle più piccole, quindi, un maggior livello di dettaglio per cui è necessaria una maggiore potenza di calcolo.

Questo per quanto riguarda la risoluzione spaziale, ma vi è anche una risoluzione temporale dei modelli che dipende dalla dimensione del passo temporale.

I modelli climatici, relativamente alle condizioni iniziali, sono diversi tra di loro e sono probabilistici, cioè indicano quali aree hanno maggiori probabilità di essere più fredde o più calde, più piovose o più secche in base alla variabile considerata.

La valutazione del modello viene effettuata, ad esempio, confrontando i risultati di simulazioni modellistiche del clima passato (simulazioni storiche) con osservazioni o reanalisi (hind-casting). Viene così verificata l'accuratezza dei modelli (vengono valutate le prestazioni dei singoli modelli o di una media di un gruppo di modelli, media di ensemble) e vengono eventualmente modificate le equazioni su cui si basano.

I regional climate model (RCM) si differenziano dai modelli climatici globali per il fatto di essere dei modelli che dipendono da condizioni al contorno che derivano da specifici modelli di circolazione generale (GCM guida) o da un set di dati basati sull'osservazione (reanalisi), attraverso dei metodi di downscaling, con lo scopo di simulare processi atmosferici e della superficie terrestre, tenendo conto dei dati topografici ad alta risoluzione, delle caratteristiche della superficie e delle varie componenti del sistema Terra, a livello regionale o locale.

Effettuare un'operazione di downscaling significa considerare informazioni note a scala globale e utilizzarle per effettuare simulazioni a scale regionali o locali, si ottengono così informazioni ad alta risoluzione partendo da variabili rappresentate a più basse risoluzioni.

I modelli GCM infatti, rispetto ai RCM, eseguono simulazioni a risoluzioni più basse con conseguente minore capacità di risolvere problemi fisici a livello locale e regionale, non considerando fattori locali come gli effetti topografici.

Per quel che riguarda il downscaling dinamico, gli output di modelli globali vengono utilizzati come guida per un modello numerico regionale, con lo scopo di simulare variabili, considerando le condizioni locali in modo più dettagliato. Per quanto riguarda il downscaling statistico, viene invece stabilita una relazione statistica tra variabili (caratteristiche climatiche) su larga scala e variabili (caratteristiche climatiche) su scala locale o regionale, sfruttando dati storici.

Gli RCM possono essere strumenti particolarmente efficaci nel valutare i cambiamenti di indicatori relativi ad eventi estremi; tuttavia, vi è una certa eterogeneità per quanto riguarda le informazioni basate su simulazioni dei modelli RCMs tra le varie regioni {Giorgi et al. 2019}, per cui non è stato possibile avere una visione globale dei cambiamenti nei diversi indici estremi basati sulle proiezioni degli RCM.

È stata però lanciato un progetto, nell'ambito dell'esperimento Coordinated Regional Downscaling Experiment (CORDEX), chiamato CORDEX-CORE {Gutowski et al. 2016}, il cui scopo è fornire un ensemble omogeneo di proiezioni ad alta risoluzione (25 km di spaziatura della griglia) per le regioni di tutto il mondo (suddiviso in specifici domini) {E. Coppola, 2021}.

Per tali modelli bisogna comunque considerare i vari fattori regionali come la complessità topografica. Ci sono altri fattori però da tenere in considerazione, ad esempio per quel che riguarda l'ensemble di modelli europeo CORDEX, nelle proiezioni non considera gli effetti della CO₂ sulla fotosintesi che portano ad una diminuzione dell'evapotraspirazione e dunque questo genera bias nella rappresentazione delle temperature estreme {Boè et al., 2020}.

In questo studio però vengono considerati esclusivamente modelli di circolazione globale ed in particolare i modelli utilizzati fanno parte del Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6).

CMIP6 è un progetto coordinato dal Working Group on Coupled Modelling (WGCM) nell'ambito del World Climate Research Programme (WCRP), in particolare per quel che riguarda le sei Grandi Sfide della WCRP e una tematica aggiuntiva in collaborazione con il progetto Analisi, Integrazione e Modellazione del Sistema Terra (AIMES) che racchiude le questioni relative a forzanti e retroazioni biosferiche.

La fase 6 si basa sulle fasi precedenti (come CMIP3 o CMIP5) eseguite sotto la guida del Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison (PCMDI) e si affida all'Earth System Grid Federation (ESGF) e al Centre for Environmental Data Analysis (CEDA) insieme a numerose attività correlate per l'implementazione. Il progetto comprende le simulazioni di circa 120 modelli climatici globali e circa 45 istituzioni e organizzazioni di tutto il mondo ne prendono parte. Coordinando la progettazione e la distribuzione delle simulazioni di modelli climatici globali del clima passato, presente e futuro, il CMIP è diventato uno degli elementi fondamentali delle scienze climatiche. Con la necessità di affrontare un numero sempre maggiore di questioni scientifiche è avvenuta una progressiva revisione del CMIP, arrivando al CMIP6. L'ultima versione consiste in:

- vari esperimenti comuni: il Diagnostic, Evaluation and Characterization of Klima (DECK), piccola serie di esperimenti standardizzati che vengono eseguiti ogni volta che viene sviluppato un nuovo modello) e le simulazioni storiche del CMIP (1850-vicino al presente) che mantengono una sorta di continuità e documentano le caratteristiche di base dei modelli attraverso le diverse fasi del CMIP
- standard comuni, un coordinamento ed un'infrastruttura che facilitano la distribuzione dei risultati dei modelli e la caratterizzazione dell'insieme dei modelli
- un insieme di progetti di intercomparazione tra modelli (MIP) approvati dal CMIP che saranno specifici per la fase CMIP6, per ulteriori esperimenti che i gruppi di modellazione potranno scegliere da eseguire in base al loro interesse e/o alle risorse informatiche.

Il CMIP6 ha lo scopo di rispondere a tre domande in particolare:

- Come risponde il sistema Terra ai forzanti?
- Quali sono le origini e le conseguenze dei bias sistematici dei modelli?
- Come possiamo valutare i futuri cambiamenti climatici data la variabilità climatica interna, la prevedibilità e le incertezze degli scenari? {Eyring, V. 2016.}

Di seguito una descrizione dei modelli utilizzati in tale studio:

Per quel che riguarda CMCC-ESM2, la Fondazione Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (CMCC) ha contribuito al Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) fin dalle sue prime fasi, in quanto la ricerca sull'evoluzione del clima e dei cicli biogeochimici globali è un pilastro strategico per garantire il mantenimento di un sano equilibrio tra il nostro pianeta e noi stessi (CMCC, 2020). Si è nel tempo arrivati allo sviluppo di una nuova generazione di modelli accoppiati globali per rispondere a diverse esigenze e applicazioni per la ricerca climatica CMIP6 fino al CMCC-ESM2, che rappresenta il modello del sistema terrestre (Earth System Model) di seconda generazione, includendo una serie di processi biogeochimici

marini e terrestri rispetto alla precedente versione CMIP5. In particolare, per quanto riguarda la biogeochimica terrestre, tale modello considera un insieme di pool di carbonio più ampio e maggiori tipi funzionali di piante, e viene meglio rappresentato il ciclo dell'azoto. Rimodellata anche la rappresentazione dell'ecosistema marino.

CMCC-ESM2 si basa sull'accoppiamento tra il modello climatico accoppiato CMCC-CM2 (che tiene conto delle interazioni tra le componenti di atmosfera, oceano, ghiaccio marino e terra) e una più complessa biogeochimica marina e terrestre per rappresentare pienamente i cicli globali del carbonio. CMCC-ESM2, infatti, integra componenti di modellazione specifici per atmosfera (CAM5.4), oceano (NEMO3.6), ghiaccio marino (CICE4), superficie terrestre (CLM4.5) e biogeochimica oceanica (BFM5.1) {Cherchi, A. et al., 2019; Vichi, M. et al., 2011}.

CMCC-ESM2 ha una sensibilità climatica di 3.57°C (parametro di tuning dei modelli climatici di simulazione del clima, che esprime, sotto forma di un fattore moltiplicativo, la risposta termica in termini di temperatura media globale del sistema climatico al raddoppio di concentrazione di anidride carbonica in atmosfera). La sensibilità del CMCC-ESM2 è vicina alle medie multi-modello sia di CMIP5 che di CMIP6. La configurazione CMIP6 di riferimento di CMCC-ESM2 ha una risoluzione orizzontale atmosferica di circa 1° , con una griglia regolare di $0,9^{\circ} \times 1,25^{\circ}$ in latitudine e longitudine, mentre in verticale tiene conto di 30 strati fino a 2 hPa. La componente terrestre utilizza la stessa griglia orizzontale dell'atmosfera e la struttura verticale del suolo è rappresentata da 15 strati fino alla profondità di 42 m, mentre i calcoli idrologici sono eseguiti sui 10 strati superiori, fino a 3,8 m {Oleson et al., 2013}. Per l'oceano si ha una risoluzione nominale di 1° , con una spaziatura meridionale più fine in prossimità dell'Equatore. Nella dimensione verticale sono considerati 50 livelli di geopotenziale, che vanno da 1 m in superficie a 400 m di spessore nell'oceano profondo. La griglia orizzontale del modello oceanico è utilizzata per la componente del ghiaccio marino con risoluzione dello stato del ghiaccio marino su cinque diverse categorie di spessore. {T. Lovato et. al. 2022}

BCC-CSM2-MR è la versione a media risoluzione del modello del sistema climatico del Beijing Climate Center (BCC), e rappresenta il modello di base per BCC nel contribuire al Progetto di Intercomparazione dei Modelli (CMIP6). Tale modello cattura abbastanza bene le tendenze al riscaldamento globale della temperatura dell'aria superficiale dal 1950 al 2014.

È evidente un bias a livello della zona di convergenza intertropicale (ITCZ), che scompare nel modello a più elevata risoluzione.

Il modello climatico BCC-CSM2-MR, rilasciato nel 2017, comprende le seguenti componenti: atmosfera: BCC_AGCM3_MR (T106; 320×160 longitudine/latitudine; 46 livelli), terra: BCC_AVIM2, oceano: MOM4 (360×232 longitudine/latitudine; 40 livelli), ghiaccio marino: SIS2 e risoluzioni nominali: atmosfera: 100 km, terra: 100 km, oceano: 50 km, ghiaccio marino: 50 km {Xin, Xiaoge et. al, 2018}.

La famiglia dei modelli climatici INM-CM, come la maggior parte dei modelli del sistema climatico, è composta da due blocchi principali: il modello di circolazione generale dell'atmosfera (variabili del modello sono le componenti orizzontali del vento, la temperatura, l'umidità specifica e la pressione superficiale) e il modello di circolazione generale degli oceani. Il modello climatico INM-CM5-0, l'ultima versione della famiglia di modelli INM-CM, rilasciato nel 2016, comprende i seguenti componenti: aerosol: INM-AER1, atmosfera: INM-AM5-0 (2x1,5; 180 x 120 longitudine/latitudine; 73 livelli), terra: INM-LND1, oceano: INM-OM5 (longitudine/latitudine; 40 livelli), mare: INM-ICE1.

Le simulazioni di tale modello sono eseguite dall'Institute of Numerical Mathematics of the Russian Academy of Sciences di Mosca, con risoluzioni nominali: aerosol: 100 km, atmosfera: 100 km, terra: 100 km, oceano: 50 km, mare: 50 km. L'INM-CM5 riprende la maggior parte delle parametrizzazioni atmosferiche dalla versione precedente (INM-CM4). Uno dei pochi cambiamenti degni di nota, rispetto alla versione precedente, è la nuova parametrizzazione delle nubi e della condensazione su larga scala. Le altre parametrizzazioni atmosferiche dell'INMCM5 (riguardo a convezione profonda e superficiale, onde gravitazionali, superficie di terreno e suolo, equazioni inerenti a temperatura e umidità specifica del suolo, distribuzione spaziale della vegetazione, radiazione atmosferica) sono simili a quelle dell'INMCM4 con alcuni coefficienti riadattati per tenere conto dei cambiamenti nella risoluzione verticale. Nell'INMCM5 il modello atmosferico è completato dal blocco degli aerosol, assente nell'INMCM4.

Il modello climatico INMCM5 presenta il modulo del ciclo del carbonio {Volodin 2007}, in cui vengono calcolati la concentrazione di CO₂ atmosferica, il carbonio nella vegetazione, nel suolo e nell'oceano. Nel suolo, viene considerato un singolo pool di carbonio. Nell'oceano, l'unica variabile inerente al ciclo del carbonio è il carbonio inorganico totale. Il modello calcola l'emissione di metano dalle zone umide e considera un ciclo del metano semplificato{Volodin 2008}. Nel modello sono incluse anche le parametrizzazioni di alcuni fenomeni elettrici. Il modulo del ghiaccio marino è incluso nel blocco oceanico. I moduli di suolo, superficie e vegetazione sono inclusi nel blocco atmosferico {E. M. Volodin et.al, 2017}.

2.2 GLI SCENARI EMISSIVI

Una volta che viene valutato il modello sul periodo storico e risulta performante, è possibile con lo stesso modello effettuare soddisfacenti proiezioni future, considerando un forzante climatico che cambia secondo diversi scenari climatici, sulla base di determinate condizioni future.

Nel 2013, scienziati climatici hanno concordato una serie di scenari incentrati su livelli di gas serra in atmosfera al 2100: gli scenari Representative Concentration Pathway (RCP), sulla base di determinati valori di forzante climatico (W/m^2), considerano emissioni e concentrazioni di gas serra in atmosfera che cambiano nel tempo con un determinato tasso (traiettoria, percorso, pathway).

Tali scenari considerano una quantità di emissioni future e livelli di concentrazione di gas serra che dipendono da sviluppi tecnologici, cambiamenti nella produzione di energia e uso del suolo, economie globali e regionali, crescita della popolazione.

In base a tali fattori, vengono considerati principalmente 4 RCPs: 2.6; 4.5; 6; 8.5. Ad ogni RCP corrisponde un valore del forzante (misura dell'influenza che un fattore ha nell'alterare l'equilibrio tra energia in entrata e in uscita per un determinato sistema, come il Sistema Terra) ed una diversa traiettoria, velocità ed entità del cambiamento di una variabile climatica presa in esame, fornendo una base per valutare il rischio del superamento di soglie associate a determinati impatti. Vengono utilizzati non solo per studiare possibili impatti, ma anche le cause di determinati eventi estremi, processi alla base e possibili risposte (ad esempio risposte politiche).

Per ogni modello diverso, che considera lo stesso scenario emissivo, è necessario che la metrica utilizzata e il punto di partenza siano gli stessi.

Si hanno diversi scenari emissivi poiché vi sono diversi possibili progressi scientifici nella comprensione del sistema climatico, diversa mitigazione dei cambiamenti climatici, impatti, adattamenti e vulnerabilità (differenti politiche di controllo inquinamento atmosferico e politica climatica, relativa ad esempio al diverso consumo di energia e da dove questa derivi), così come il diverso uso delle forze trainanti (uso di combustibili fossili, fertilizzanti...).

In tale studio è stato preso in considerazione lo scenario più pessimistico: RCP8.5 (o ssp5-8.5), che considera una politica climatica meno vigorosa e dunque maggiori emissioni e concentrazioni di gas serra in atmosfera, con un tasso in rapido aumento nel corso del secolo (al 2100).

2.3 METODI DI ANALISI

In merito alla manipolazione dei dati climatici, relativi alle temperature massime giornaliere e successivamente per il calcolo dell'indice HWDI, sono stati utilizzati strumenti informatici, in particolare Climate Data Operators (CDO, raccolta di operatori per l'elaborazione dei dati di modelli climatici e di previsione, incluse funzioni statistiche e aritmetiche, strumenti di selezione, sottocampionamento dei dati e interpolazione spaziale) e NCO (ncdump e ncview), così come Python (APPENDICE B) per la realizzazione delle mappe.

Per il periodo storico 1980-2014 per ogni modello, i dati relativi alle temperature massime giornaliere, in differenti file, sono stati concatenati e sono stati selezionati solo i dovuti timestep (step temporali) (1).

Tale periodo storico (1980-2014) è stato selezionato per effettuare in seguito il confronto con ERA5, al fine di valutare le prestazioni dei modelli i cui dati delle tasmax giornaliere disponibili sono per il periodo 1980-2020 e anche nel caso di ERA5 sono stati selezionati gli opportuni timestep.

È stata poi calcolata la media delle temperature massime giornaliere su tutto il periodo storico per tutti e 3 i modelli e per ERA5 (2).

Successivamente è stata effettuata la conversione della media delle temperature massime da gradi Kelvin a Celsius per ERA5 e per i tre modelli (3).

Una prima visualizzazione dei dati è stata fatta attraverso `ncdump`, comando che converte file NetCDF in un formato testo comprensibile all'uomo, e “graficamente” attraverso `ncview`, un visual browser per file NetCDF.

Con una prima visualizzazione dei dati attraverso `ncview`, sono state fatte le prime osservazioni relative alla distribuzione delle temperature massime a livello globale.

In seguito, è stata effettuata una rimappatura bilineare (`remapping`), al fine di interpolare i dati di ogni modello su una griglia comune (in questo caso quella di ERA5, a più elevata risoluzione), essendo modelli su griglie diverse, previa creazione della griglia di riferimento considerando la griglia di ERA5 (4).

Dopo aver interpolato i dati di ogni modello sulla griglia di ERA5, è stata poi effettuata una media di ensemble dei modelli (5).

Dopodiché si è proceduto con il calcolo dell'indice HWDI, dopo però aver ricavato il 90° percentile delle temperature massime giornaliere per il periodo storico per i singoli modelli (6) e per ERA5 (7).

Infine, previa interpolazione ad una griglia comune (di ERA5) (8), è stata calcolata la media di ensemble dei vari indici HWDI calcolati per ogni singolo modello (9), considerando comunque il numero di giorni di ondata di calore l'anno, ottenuto effettuando la divisione per il numero di anni, 35 (10).

Per convalidare i risultati ottenuti attraverso il metodo utilizzato in questo studio, attraverso i comandi CDO, sia per quel che riguarda la media delle temperature massime giornaliere, sia per quanto riguarda il calcolo dell'indice HWDI (utilizzando come soglia il 90° percentile), sono stati confrontati i risultati, rappresentati attraverso la creazione di mappe (tramite Python), con altre mappe che rappresentano i risultati di altri studi.

Per quanto riguarda la media delle temperature massime giornaliere per ERA5, la mappa creata per questo studio è stata confrontata con la mappa prelevata dal portale dell'IPCC: <https://interactive-atlas.ipcc.ch/regional-information> (ERA5, periodo storico 1980-2015) e i risultati risultano essere in accordo.

Per quanto riguarda l'indice HWDI, una volta calcolato, i risultati ottenuti sono stati confrontati con quelli dello studio di Monica Ionita, Diana E. Caldarescu e Viorica Nagavciuc (2021), relativamente al numero di giorni di ondata di calore l'anno (HWDI), per gli anni 2003 e 2012 (HWDI), calcolato con il medesimo metodo utilizzando come soglia il 90° percentile delle temperature massime giornaliere sul periodo 1971–2000 per quanto riguarda il dataset E-OBS v23.1e .

Dunque, precisando che il periodo storico di riferimento sia shiftato e il dataset di riferimento è differente da ERA5, i risultati per l'indice calcolato per lo studio presentato con questa tesi risultano in accordo, in particolare a livello di distribuzione spaziale del numero di giorni di ondata di calore per gli anni 2003 e 2012 (11).

Successivamente, per valutare le prestazioni dei modelli climatici utilizzati nel simulare le temperature massime giornaliere (media), si è proceduti nel ricavare i bias, sottraendo la media delle `tasmx` di ERA5 alla media dell'analogica variabile simulata dall'ensemble dei tre modelli (12). Si possono a questo punto valutare le prestazioni modellistiche analizzando il bias ricavato, sempre attraverso mappe costruite attraverso Python.

Il bias rappresenta la misura di quanto il modello differisce dalle osservazioni, o come in questo caso dalle reanalisi. Questo è ad esempio dovuto a risoluzione spaziale limitata (grandi dimensioni della griglia), processi termodinamici e fisici semplificati o comprensione incompleta del sistema climatico globale.

Un bias positivo rappresenta una sovrastima dei modelli rispetto alle osservazioni o reanalisi e nel caso della media delle tasmx, una media delle temperature massime giornaliere maggiore rispetto a quella individuata dalla reanalisi. Così al contrario un bias negativo rappresenta una sottostima della media delle temperature massime giornaliere rispetto alla reanalisi. Il bias ha una determinata distribuzione spaziale e, quindi, in determinate zone del globo il bias è positivo, in altre negative, in altre ancora il bias è intorno allo zero, dunque, vi è un accordo piuttosto elevato tra modelli e osservazioni/reanalisi e quindi le prestazioni modellistiche risultano essere elevate. Effettuare la media di ensemble per molte zone migliora i risultati, poiché in questo modo si tendono ad eliminare gli errori dei singoli modelli, in modo tale che i modelli con maggiori prestazioni emergano, ma se c'è qualche errore comune a tutti i modelli, effettuando la media di ensemble, questa porta all'emergere di tali errori (bias sistematici).

Oltre a valutare i modelli nel complesso confrontando la media di ensemble con ERA5, si possono valutare i singoli modelli, ricavando il bias sottraendo la media delle tasmx di ERA5 per ogni singolo modello considerato (13).

Anche per quel che riguarda la proiezione delle temperature massime giornaliere per il periodo futuro (considerando lo scenario ssp5-8.5), relativamente ai tre modelli considerati, i dati, divisi anche in questo caso in file differenti, sono stati concatenati e sono stati selezionati i dovuti timestep, considerando, analogamente al periodo storico, 35 anni (2066-2100) (14).

Anche in questo caso è stata effettuata la media delle tasmx per ogni modello e la successiva conversione da Kelvin a Celsius (15). In seguito, è stata calcolata la media di ensemble dei tre modelli considerati, previo remapping ad una griglia comune (ERA5) (16).

A questo punto le temperature massime medie, per quel che riguarda il periodo storico, sono state confrontate con quelle del periodo futuro (secondo lo scenario emissivo ssp5-8.5) ed emergono anomalie rappresentate da ulteriori mappe (17).

Si è poi calcolato l'indice HWDI per ogni modello per il periodo futuro (2066-2100), considerando come soglia il 90°percentile delle temperature massime giornaliere, dapprima del periodo futuro (2066-2100) (dividendo poi per 35 anni per ottenere il numero di giorni di ondata di calore l'anno) (18), successivamente, considerando come soglia il 90°percentile delle temperature massime giornaliere del periodo storico (1980-2014) (si divide per 35 anni per ottenere il numero di giorni di ondata di calore l'anno) (19). Si è, anche in questo caso, calcolata la media di ensemble dei tre modelli (previo remapping) (20).

Infine, si è confrontato l'indice calcolato per ogni modello per il periodo storico con quello calcolato per il periodo futuro (considerando le 2 soglie differenti utilizzate) (21).

3 RISULTATI

3.1 RAPPRESENTAZIONE DELLE TEMPERATURE MASSIME GIORNALIERE SUL PERIODO STORICO

Si prende in esame la media delle temperature massime di ERA5 per il periodo 1980-2014 (FIG.1 A).

I valori più elevati si hanno in prossimità delle aree continentali tropicali, come l'Africa a livello del Sahel e sud-est della Penisola Arabica, con picchi intorno ai 35°C. In generale la media delle temperature massime giornaliere per l'Africa tropicale dell'emisfero boreale (ad eccezione delle aree montuose dell'Est Africa) è maggiore di 30°C, mentre per l'Africa tropicale dell'emisfero australe la media delle temperature massime è maggiore di 25°C, con picchi intorno ai 30°C, ad eccezione delle aree montuose e del Sud Africa (temperature massime inferiori).

Per la regione amazzonica e nord-ovest del Brasile, la media delle temperature massime è maggiore di 30°C. Analoga situazione per l'India, parte del Sud-Est asiatico e Nord dell'Australia con valori anche vicini ai 35°C. Per il Centro America, valori superiori ai 25°C, con picchi maggiori di 30°C, ad eccezione delle aree montuose ad altitudini più elevate.

Alle medie latitudini dell'emisfero boreale si hanno valori tra i 15°C e i 20°C, ad eccezione delle catene montuose, mentre alle alte latitudini dell'Emisfero Nord si ha una media delle temperature massime intorno agli 0°C, ad eccezione di Scandinavia e Islanda, i cui valori sono superiori agli 0°C.

Analizzando la simulazione della media di ensemble dei tre modelli considerati (BCC-CSM2-MR, CMCC-ESM2, INM-CM5-0) sul periodo 1980-2014 (FIG.1 B), i valori più elevati della media delle temperature massime si hanno in prossimità delle aree continentali tropicali, in particolare Africa del Nord, escluse le regioni mediterranee, con temperature vicine ai 30°C e picchi maggiori di 35°C a livello del Sahara occidentale e Sahel. Per la Penisola Arabica i valori sono maggiori di 30°C, intorno ai 35°C per la parte sud-orientale, analogamente per l'India, con valori vicini ai 35°C per la parte nord-occidentale. Anche per la regione amazzonica in Sud America e per l'Australia del Nord la media delle temperature massime è superiore ai 30°C.

Alle medie latitudini si hanno valori tra i 15°C e i 20°C, ad eccezione anche in questo caso per le zone montuose. Per le alte latitudini, la media delle temperature massime giornaliere risulta essere intorno a 0°C, con picchi negativi sulla Groenlandia e picchi positivi su Scandinavia, Islanda e Alaska (con temperature anche maggiori di 5°C). Per quanto riguarda le medie latitudini dell'emisfero australe, si hanno valori intorno ai 15°C su parte meridionale del Sud America, parte meridionale del Sud Africa e Sud dell'Australia.

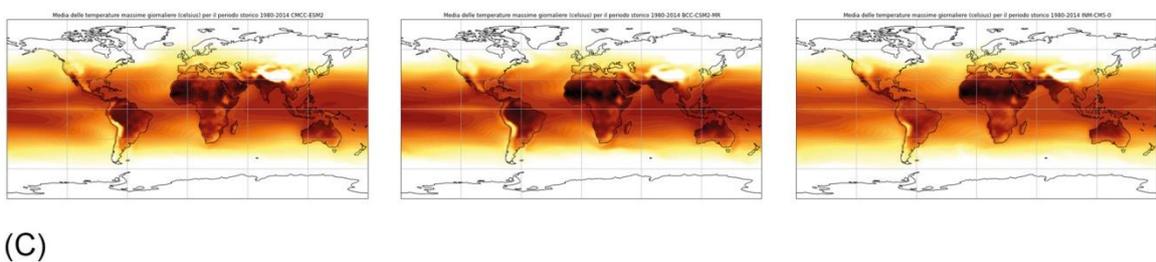
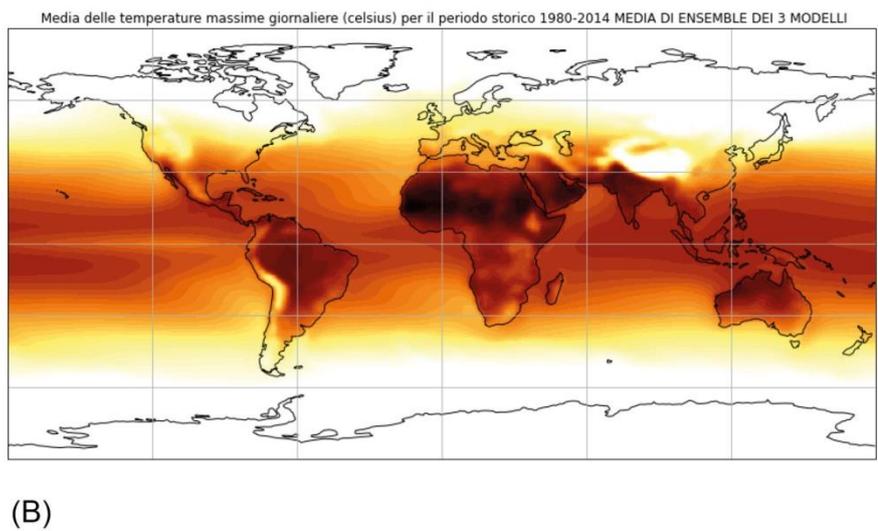
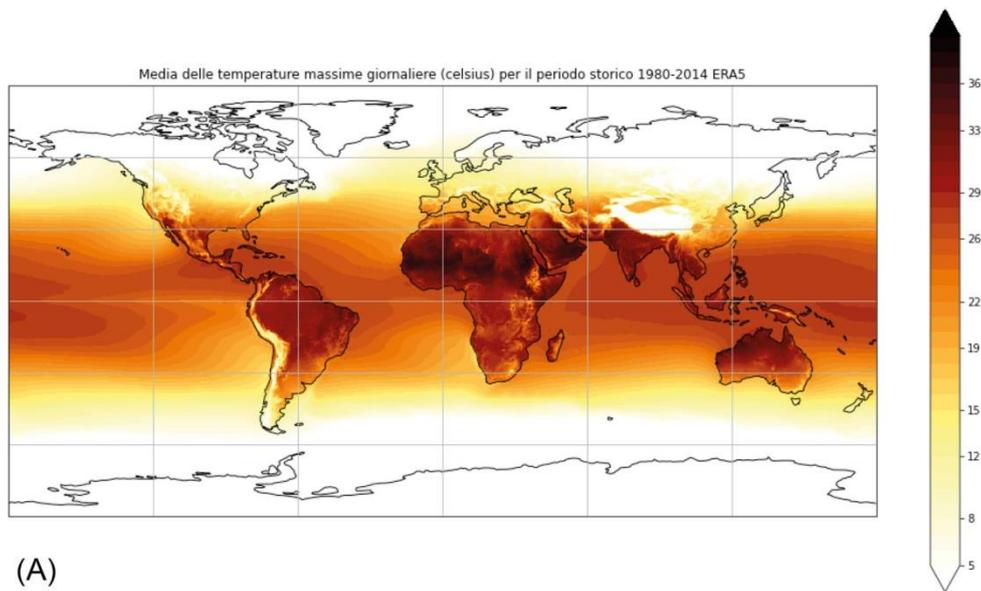


FIG.1 - Mappe che rappresentano la media delle temperature massime giornaliere (in gradi Celsius) per il periodo storico 1980-2014, considerando, la reanalisi ERA5 (A), la media di ensemble dei tre modelli utilizzati (B) e i tre singoli modelli (C).

Considerando la media di ensemble dei tre modelli relativamente alle tasmax disponibili ed effettuando il confronto con la reanalisi ERA5, sono state valutate le prestazioni modellistiche (FIG 2. A).

Alle alte latitudini si ha una sovrastima delle temperature lungo le coste settentrionali e occidentali del Nord America (Alaska e Canada), mentre si hanno bias negativi lungo le coste della Groenlandia, in particolare nella parte sud-orientale tra l'Islanda e la Groenlandia stessa. Bias negativo anche sulla Scandinavia e parte della Russia, ma si ha una sovrastima lungo le coste nord della Siberia.

Alle medie latitudini si trovano bias positivi lungo le coste sud-occidentali e orientali del Nord America, con picchi del valore del bias di circa +2. Una leggera sovrastima delle temperature massime la si trova a livello del Nord America centrale, mentre un'alternanza di bias positivi e negativi si osservano in corrispondenza delle Montagne Rocciose.

Sull'Europa, bias leggermente positivo, in particolare a livello delle principali catene montuose come Pirenei, Alpi e Caucaso. Alternanza invece di bias positivi e negativi a livello del Medio Oriente e Asia Centrale in corrispondenza delle principali catene montuose, così come lungo le catene montuose dell'Africa orientale e Madagascar e la catena montuosa andina.

L'ensemble dei modelli sottostima la media delle temperature massime giornaliere su parte dell'Asia nord-orientale e Sud-Est Asiatico, così come lungo le coste sud-orientali dell'India, al contrario si ha una sovrastima a livello del Nord dell'India e a largo delle coste orientali del Giappone. Su gran parte del Nord Africa si ha un bias positivo con picchi di +2/+3, inoltre, un bias positivo piuttosto forte si ha lungo la corrente del Benguela.

A livello della parte centrale del Sud America si ha una sovrastima, inclusa la regione amazzonica, così come lungo le coste occidentali del Sud America, mentre nella parte orientale e meridionale si hanno bias negativi. Bias piuttosto ridotto, quindi buone prestazioni dei modelli nel rappresentare le temperature massime, per gran parte degli oceani e l'Australia.

Generale sovrastima più o meno intensa invece lungo la corrente circumpolare antartica, ma in prossimità di gran parte delle coste antartiche si ha un bias negativo.

Analizzando le prestazioni dei singoli modelli, emergono comunque delle differenze: ad esempio considerando il modello INM-CM5-0 in confronto ad ERA5 (FIG.2 D), si ha una generale sottostima delle temperature alle alte latitudini, in particolare lungo le coste della Groenlandia. Anche per l'oceano Atlantico settentrionale si hanno bias negativi piuttosto importanti, soprattutto in prossimità dell'Islanda.

Si ha una sottostima della media delle temperature massime giornaliere per gran parte dell'Alaska e tra Scandinavia e Russia occidentale, al contrario lungo gran parte delle coste canadesi (così come in parte della Corrente del Golfo) e per la parte orientale della Siberia è osservabile un bias positivo.

Alle medie latitudini dell'emisfero settentrionale si ha un'alternanza di bias positivi e negativi, con preponderanza di valori di bias positivi, a livello delle catene montuose del Medio Oriente e Asia Centrale, e Montagne Rocciose.

Bias positivo presente a livello del Nord America centrale e le sue coste occidentali, dell'Europa Meridionale, di gran parte del Giappone ed a largo delle sue coste orientali.

A latitudini inferiori INM-CM5-0 si ha una sovrastima delle temperature massime su gran parte del Nord Africa, parte della penisola arabica e Mar Rosso.

Il modello invece sottostima le temperature massime su India orientale e gran parte del Sud-Est Asiatico, analogamente per il Sud America nord-orientale. Lungo la catena montuosa andina, invece, bias piuttosto positivo.

Alternanza di bias negativi e positivi a livello dei monti dell'Africa orientale e Madagascar, ma con preponderanza di valori piuttosto negativi.

Il modello sovrastima le temperature massime lungo le coste occidentali del Sud America, Corrente del Benguela e per gran parte della Corrente Circumpolare Antartica, mentre un'alternanza di bias positivi e negativi per la regione antartica.

Al contrario confrontando il modello CMCC-ESM2 con ERA5 (FIG.2 C) si ha una generale sovrastima delle temperature massime alle alte latitudini dell'emisfero boreale, in particolare sul Mar Glaciale Artico. A livello continentale si ha un bias positivo, sia alle alte che alle medie latitudini dell'emisfero boreale.

A livello delle Montagne Rocciose e catene montuose del Medio Oriente e Asia Centrale si hanno bias positivi in alternanza a bias piuttosto negativi. Un bias più elevato lo si trova lungo parte della Corrente del Golfo.

A livello delle regioni subtropicali, i valori dei bias sono piuttosto piccoli, da notare, però, che in Messico il modello tende a sottostimare le temperature, al contrario a livello dell'India settentrionale in cui si ha un bias positivo.

Per quel che riguarda le regioni tropicali, si ha un bias positivo a livello della regione amazzonica e Sud America Centrale, mentre per la catena montuosa andina analogamente alle catene montuose dell'Africa orientale si ha un'alternanza di bias negativi e positivi.

Buone prestazioni da parte del modello per l'Africa, Australia e la maggior parte degli oceani, per cui il bias è piuttosto piccolo.

Bias negativo in prossimità delle coste antartiche, ma bias positivo lungo la parte centrale della Corrente Circumpolare Antartica. Per quando riguarda invece l'Antartide si ha un'alternanza di valori del bias negativi e positivi.

Dal confronto del modello BCC-CSM2-MR con ERA5 (FIG. 2 B) si nota un bias negativo abbastanza importante tra le coste orientali della Groenlandia, e le coste a Nord di Islanda e Scandinavia, con picchi anche di valori sui -5, invece il modello sottostima leggermente le temperature massime per gran parte della Siberia e Asia nord-occidentale.

Generale sottostima delle temperature si ha a livello del Nord America occidentale (in particolare coste meridionali dell'Alaska), ma si hanno valori di bias positivi in corrispondenza delle Montagne Rocciose.

Bias piuttosto ridotti nel resto del Nord America, anche se a largo delle coste orientali, inclusa parte della Corrente del Golfo, si ha una certa sovrastima delle temperature massime.

Per la maggior parte dell'Europa bias piuttosto piccoli.

Alternanza di bias negativi e positivi per Medio Oriente e Asia centrale con sovrastima piuttosto importante a livello delle principali catene montuose.

Per gran parte dell'Africa del Nord si hanno bias positivi, così come per l'India settentrionale.

Considerando le regioni tropicali, si ha un bias positivo anche abbastanza intenso per quel che riguarda la regione amazzonica in Sud America e lungo la Corrente del Benguela in prossimità delle coste centro sud-occidentali dell'Africa.

In generale a livello degli oceani tropicali si ha un bias positivo. Sovrastima piuttosto intensa è presente a livello dell'oceano Atlantico meridionale, in prossimità delle coste antartiche.

Il modello risulta avere buone prestazioni nel simulare le temperature massime per l'Australia.

Confrontando le prestazioni dei singoli modelli, emerge, ad esempio, che i due modelli CMCC-ESM2 e INM-CM5-0 simulano le temperature massime giornaliere sul periodo storico alle alte latitudini dell'emisfero settentrionale in maniera diversa. Il primo tende alla sovrastima, invece il secondo tende alla sottostima, ad eccezione di alcune zone in Canada e Siberia.

Un'altra differenza tra questi due modelli sta nella rappresentazione delle temperature per il Sud America, in particolare per la regione amazzonica.

INM-CM5-0 inoltre tende a sovrastimare le temperature a livello dell'Africa del Nord e parte della penisola arabica e sottostimarle a livello del Sud Est Asiatico, in modo maggiore rispetto all'ensemble dei modelli e agli altri modelli singoli.

Alle alte latitudini il modello BCC-CSM2-MR sovrastima maggiormente le temperature in alcune zone rispetto agli altri modelli singoli e all'ensemble dei modelli (in particolare la zona tra Canada e Groenlandia e il Nord della Groenlandia). Inoltre, tale modello sovrastima maggiormente le temperature a livello delle regioni tropicali e lungo le principali correnti oceaniche come quella del Golfo, di Kuroshio, del Benguela e la Corrente Circumpolare Antartica, rispetto sia agli altri modelli che all'ensemble.

In generale buone prestazioni dei modelli considerati si hanno nel simulare le temperature massime giornaliere a livello dell'Australia.

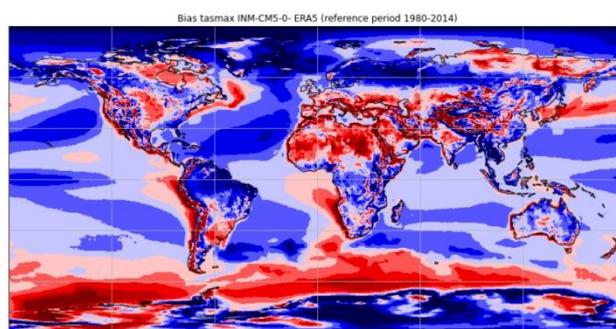
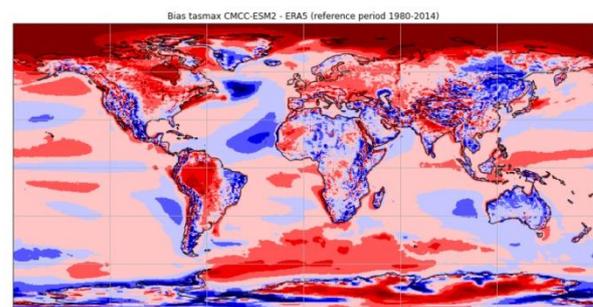
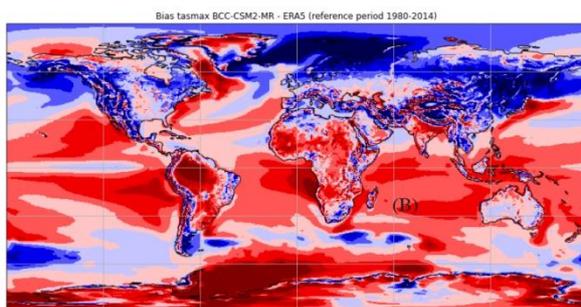
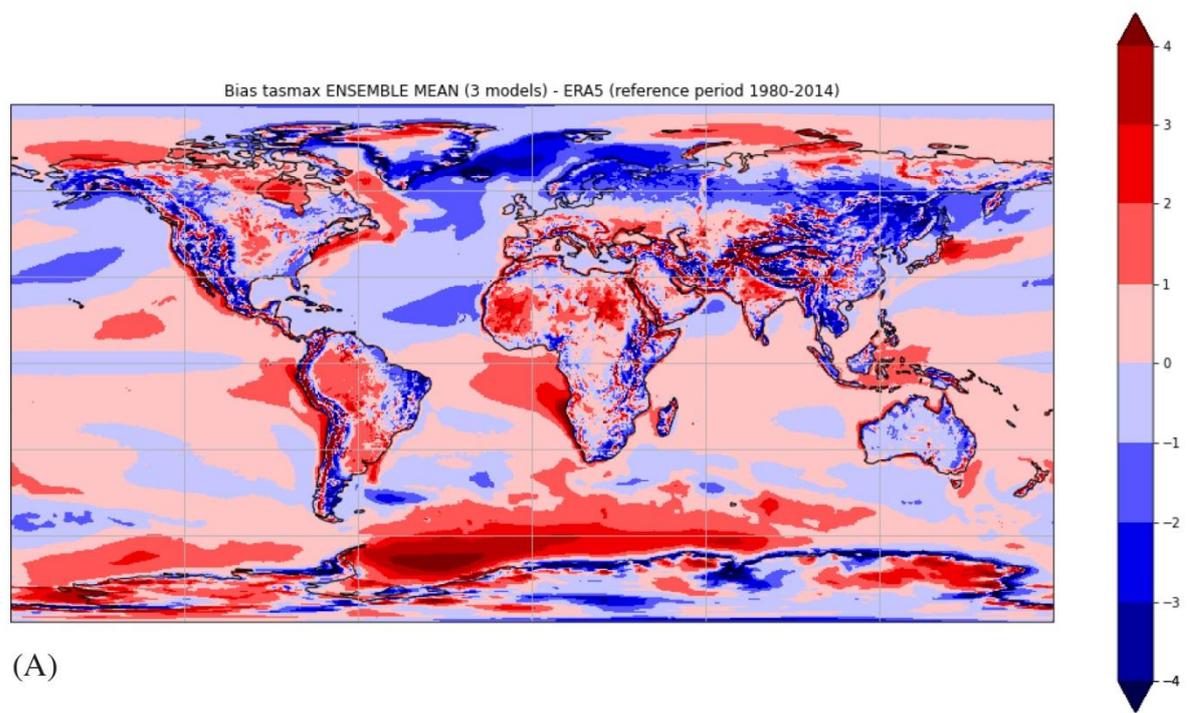


FIG. 2 - Mappe che rappresentano il bias (discostamento dei risultati delle simulazioni dei modelli dalla reanalisi, misura delle prestazioni) relativo alla simulazione della media delle temperature massime giornaliere per il periodo storico (1980-2014) ricavato dal confronto tra i modelli e la reanalisi ERA5, per quanto riguarda l'ensemble dei modelli (A) ed i singoli modelli BCC-CSM2-MR (B), CMCC-ESM2 (C), INM-CM5-0 (D).

3.2 PROIEZIONI FUTURE DELLE TEMPERATURE MASSIME GIORNALIERE

Per il periodo futuro (2066-2100), secondo lo scenario emissivo ssp5-8.5, dalle simulazioni della media delle temperature massime giornaliere da parte dell'ensemble e dei tre modelli singoli, emergono delle differenze rispetto alle analoghe simulazioni per il periodo storico (1980-2014).

Si prendono in esame le mappe che mostrano le anomalie relative alle temperature massime del periodo futuro considerato rispetto al periodo storico (differenza tra i due periodi).

Considerando l'ensemble dei tre modelli (FIG.4 A) emerge che il riscaldamento più forte (relativo alle temperature massime) si avrà, probabilmente, a livello delle alte latitudini dell'emisfero boreale, con valori maggiori anche di 8-10°C sull'Artico, tra i 6°C e gli 8°C per gran parte della Siberia e Asia nord-occidentale, così come per il Nord dell'Alaska e Nord del Canada, mentre intorno ai 5°C per il resto del Canada.

Per le alte latitudini dell'emisfero sud, le proiezioni future prevedono circa 3-4°C in più per l'Antartide e l'Oceano Antartico, ma a livello della corrente circumpolare antartica il riscaldamento è meno importante (1-2°C in più).

Per le medie-basse latitudini, probabilmente si avranno 5°C in più per Sud ed Est Europa e gran parte del Medio Oriente, ma 3-4°C in più gran parte della Penisola Arabica, così come per buona parte del Sud America, parte meridionale e settentrionale dell'Africa e Australia. Per l'Africa nord-occidentale si ha un incremento anche maggiore di 5°C.

Per le regioni equatoriali, il riscaldamento delle temperature massime per il periodo futuro risulta meno intenso, circa 2-3°C maggiori, ad eccezione dell'Amazzonia (4°C in più).

Per il modello CMCC-ESM2 (FIG.4 C) dalle proiezioni future (scenario ssp5-8.5) si evince il maggior riscaldamento a livello dell'oceano Artico e della parte più settentrionale del Canada, con temperature massime medie di oltre 10°C in più rispetto al 1980-2014.

Anche il modello INM-CM5-0 simula un riscaldamento per l'Oceano Artico (fig.4 D), meno marcato ma comunque importante, di circa 7-10°C, soprattutto a nord di Scandinavia e Siberia.

Si ha, però, un'anomalia positiva delle temperature massime che risulta inferiore per le regioni continentali delle alte latitudini nord, infatti, per la Siberia quest'ultimo modello vede un incremento di temperatura sui 5-6°C, mentre di 4-5°C per il Canada e circa 4°C per l'Alaska.

Il CMCC-ESM2, invece, simula temperature massime giornaliere dai 7°C ai 10°C maggiori per quanto riguarda la Siberia e di 5-7°C in più per il resto del Canada.

Il modello BCC-CSM2-MR (FIG.4 B) simula un'anomalia relativa alle temperature massime future, rispetto al periodo storico, di circa 7°C per l'Artico e di circa 8°C per la parte più settentrionale del Canada, invece, per la parte più nord della Siberia si hanno 6-7°C in più.

Particolare il caso della Groenlandia, in cui secondo CMCC-ESM2 si ha un incremento delle temperature massime di 4-6°C per la parte meridionale e fino a 10°C in più per la parte settentrionale.

Per tale regione, INM-CM5-0 simula invece un incremento relativo alle temperature massime di 4-5°C, mentre BCC-CSM2-MR simula 3-5°C in più.

Per quel che riguarda l'Antartide, valori delle tasmax maggiori di circa 4°C per CMCC-ESM2 e di 3-4°C secondo il modello INM-CM5-0 e BCC-CSM2-MR.

Per le medie latitudini, CMCC-ESM2, nel periodo futuro considerato, simula oltre 6°C in più per l'Est Europa e Asia centro-occidentale, temperature di 5-6°C maggiori invece per gran parte d'Europa (esclusa la parte nord-occidentale) e Medio Oriente, così come per gli Stati Uniti occidentali. Per quel che riguarda America Centrale e Stati Uniti Orientali, Nord Africa (5-6°C in più nella parte settentrionale), Cina e Giappone 4-5°C maggiori.

Il modello INM-CM5-0, invece, simula temperature massime, intorno ai 4°C maggiori per gran parte d'Europa, con anomalie meno elevate per quanto riguarda l'Europa occidentale e area mediterranea, così come per gli Stati Uniti e Asia centro-orientale; per quel che riguarda l'Asia centro-occidentale 4-5°C maggiori. Tale modello, inoltre, simula 3-4°C in più per il Nord Africa.

Il modello BCC-CSM2-MR simula 5-6°C in più su gran parte del Nord America (in particolare sul Canada e Stati Uniti settentrionali), sull'Europa meridionale, Africa nord-occidentale, Medio Oriente e Asia occidentale, inoltre si ha un'anomalia di 4-5°C per Stati Uniti meridionali e Messico.

Il riscaldamento, per quanto riguarda le temperature massime, appare meno intenso per l'emisfero australe rispetto a quello boreale.

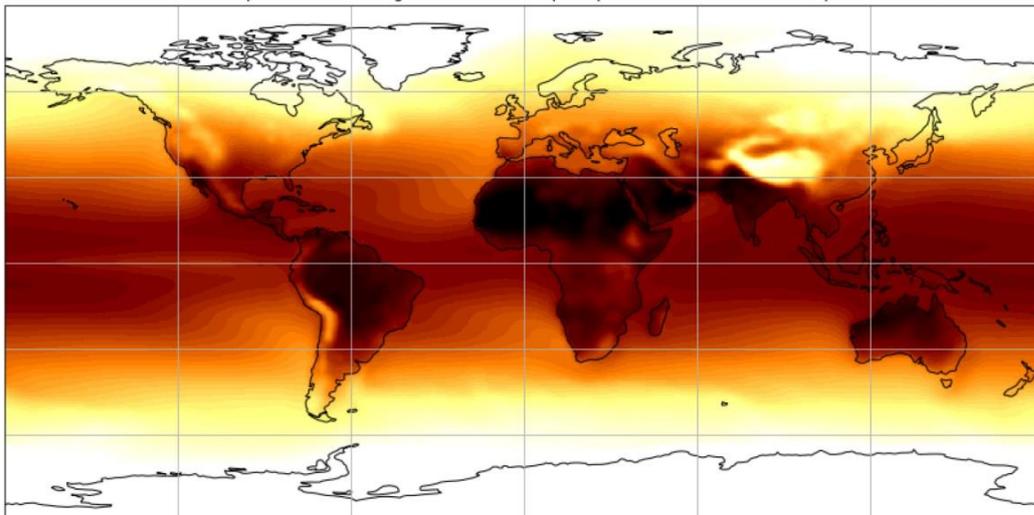
Il modello CMCC-ESM2 simula temperature massime intorno ai 5°C maggiori per Sud-America settentrionale, soprattutto per la regione amazzonica (oltre 5°C in più), Sud Africa e parte dell'Australia meridionale.

Il modello INM-CM5-0 invece simula temperature massime intorno ai 3°C in più per il Sud America centrale (con picchi intorno ai 4°C in più), Sud Africa e Australia.

Si ha un'anomalia di 3-4°C per India e Sud-Est asiatico e intorno ai 3°C per gran parte dell'Africa equatoriale secondo CMCC-ESM2, mentre INM-CM5-0 per le stesse regioni vede un incremento intorno ai 2°C. Riscaldamento meno intenso per gli oceani rispetto alle terre emerse, ad eccezione dell'Oceano Artico, ma un discreto riscaldamento viene simulato per il Pacifico settentrionale (4-5°C).

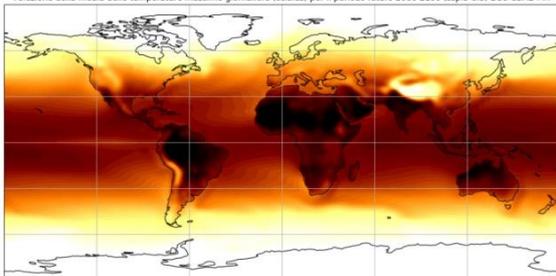
In generale si ha un maggiore riscaldamento alle alte latitudini rispetto a quelle equatoriali (in modo particolare per l'emisfero boreale). Inoltre, il modello BCC-CSM2-MR simula tra Groenlandia e Canada addirittura una decrescita della media delle temperature massime, per il periodo 2066-2100, di 1-2°C.

Poiezione della media delle temperature massime giornaliere (celsius) per il periodo futuro 2066-2100 (ssp.5-8.5) MEDIA DI ENSEMBLE



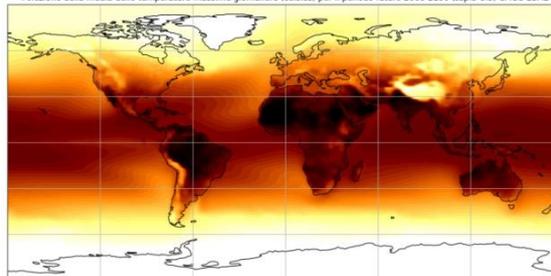
(A)

Poiezione della media delle temperature massime giornaliere (celsius) per il periodo futuro 2066-2100 (ssp.5-8.5) BCC-CSM2-MR



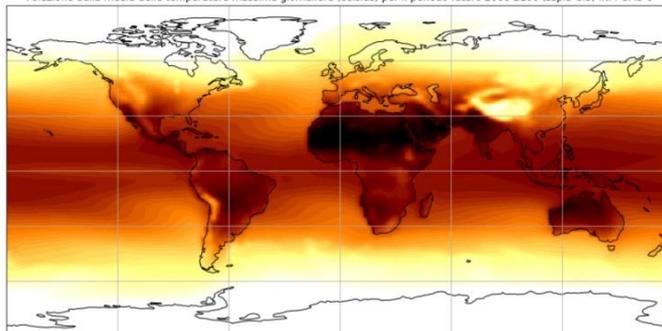
(B)

Poiezione della media delle temperature massime giornaliere (celsius) per il periodo futuro 2066-2100 (ssp.5-8.5) CMCC-ESM2



(C)

Poiezione della media delle temperature massime giornaliere (celsius) per il periodo futuro 2066-2100 (ssp.5-8.5) INM-CM5-0



(D)

FIG.3 - Proiezione della media delle temperature massime giornaliere (celsius) per il periodo futuro 2066-2100 (scenario ssp5-8.5) considerando la media di ensemble dei 3 modelli utilizzati nello studio (A); Proiezione della media delle temperature massime giornaliere (celsius) per il periodo futuro 2066-2100 (scenario ssp5-8.5) considerando il 3 singoli modelli: BCC-CSM2-MR (B), CMCC-ESM2 (C), INM-CM5-0 (D).

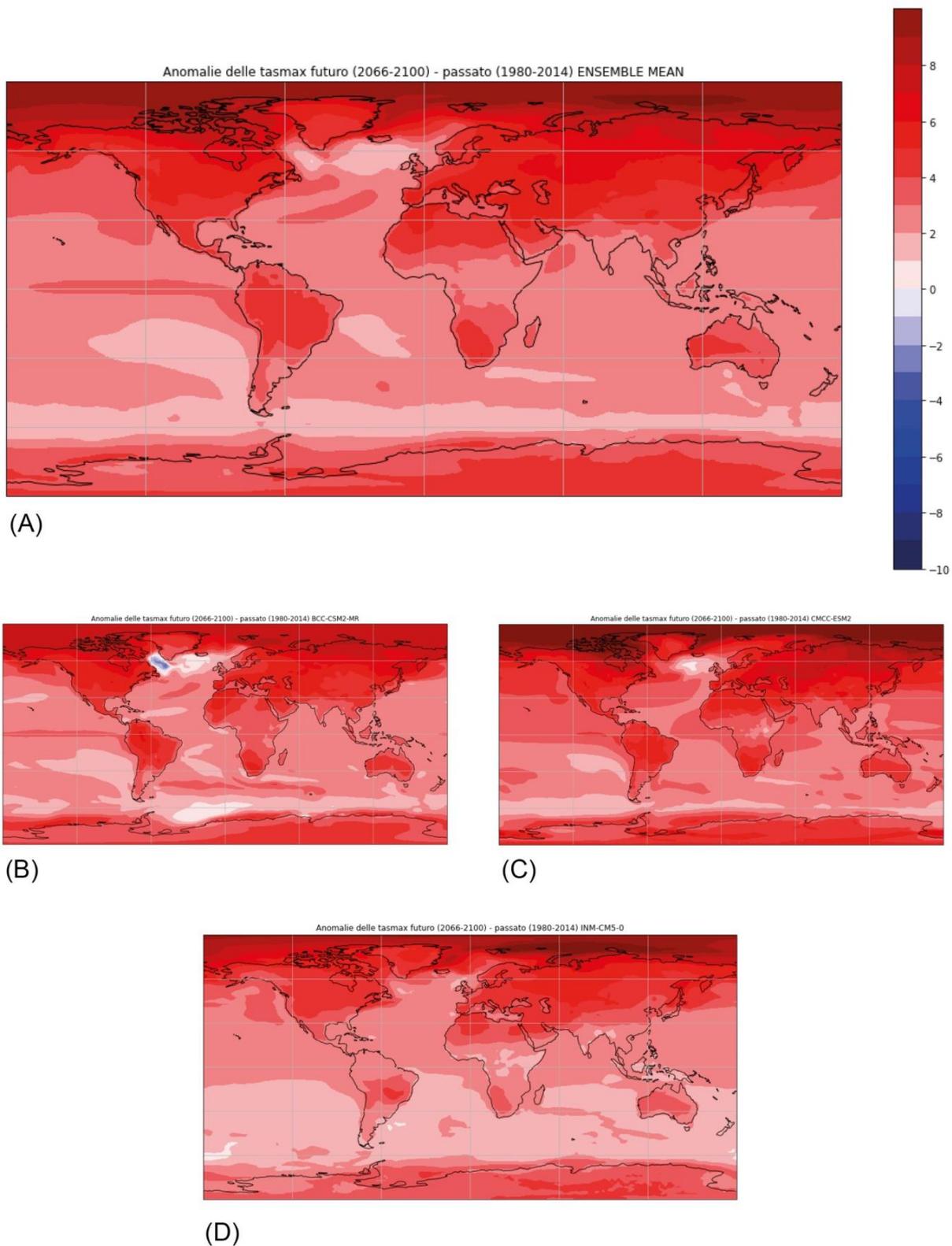


FIG.4 - Anomalia della media delle temperature massime giornaliere per il periodo futuro 2066-2100 (rispetto al periodo storico di riferimento 1980-2014) considerando la media di ensemble dei 3 modelli utilizzati nello studio (A); Anomalia della media delle temperature massime giornaliere per il periodo futuro 2066-2100 (rispetto al periodo storico di riferimento 1980-2014) considerando il modello BCC-CSM2-MR (B), il modello CMCC-ESM2 (C), il modello INM-CM5-0 (D).

3.3 RAPPRESENTAZIONE DELLE ONDATE DI CALORE SUL PERIODO STORICO

Riprendendo la definizione del HWDI, tale indice rappresenta il numero di giorni per periodo di tempo (per anno) in cui, ad intervalli di almeno 6 giorni consecutivi, la temperatura massima giornaliera è di oltre 5 gradi sopra un valore di riferimento (nel caso di questo studio il 90° percentile delle temperature massime giornaliere).

A tal proposito sono state realizzate delle mappe in cui viene mostrato il numero di giorni di ondata di calore l'anno (numero di giorni che può essere anche inferiore a 6, considerando che ci sono anni in cui in una zona non ci sono ondate di calore, definite attraverso questo indice, e altri anni in cui è possibile un superamento di 5°C del 90° per almeno 6 giorni).

Considerando il periodo storico di riferimento 1980-2014, e analizzando la mappa che rappresenta il numero di giorni di ondate di calore l'anno per ERA5 (FIG.5, A), emerge un valore piuttosto elevato per gran parte della Russia e per la parte più a nord del Canada, con picchi di oltre 15 giorni l'anno.

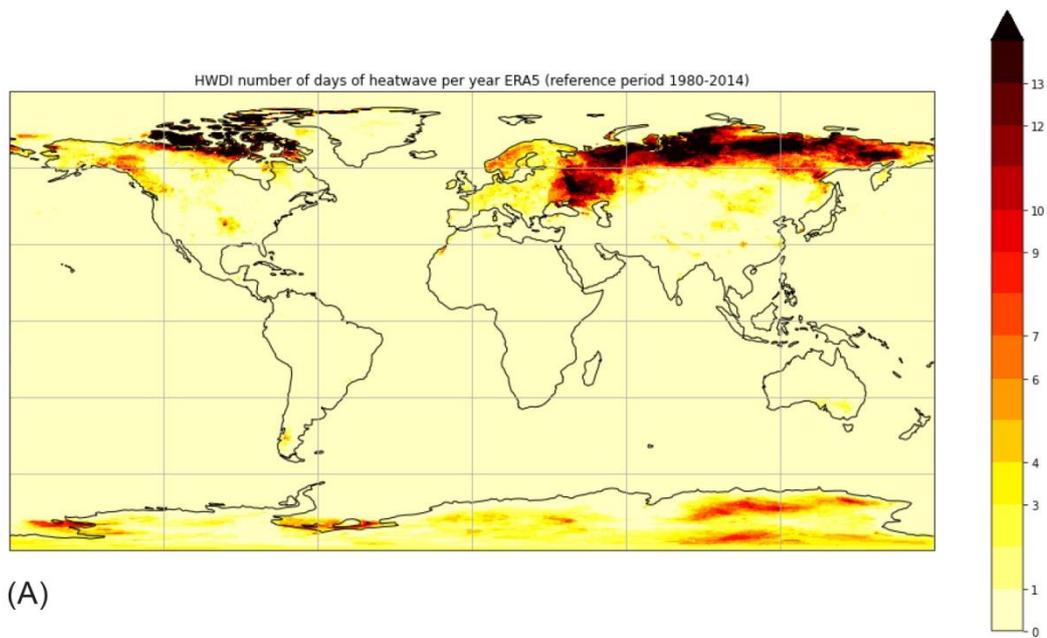
Vengono riscontrati i valori più elevati dell'indice alle alte latitudini sia dell'emisfero boreale che dell'emisfero australe, come in Antartide, dove si hanno zone con picchi superiori ai 5 giorni di ondata di calore l'anno.

Per una piccola parte degli Stati Uniti centrali e Nord America nord-occidentale si ha un numero di giorni di ondata di calore l'anno con valori intorno ai 5 giorni l'anno.

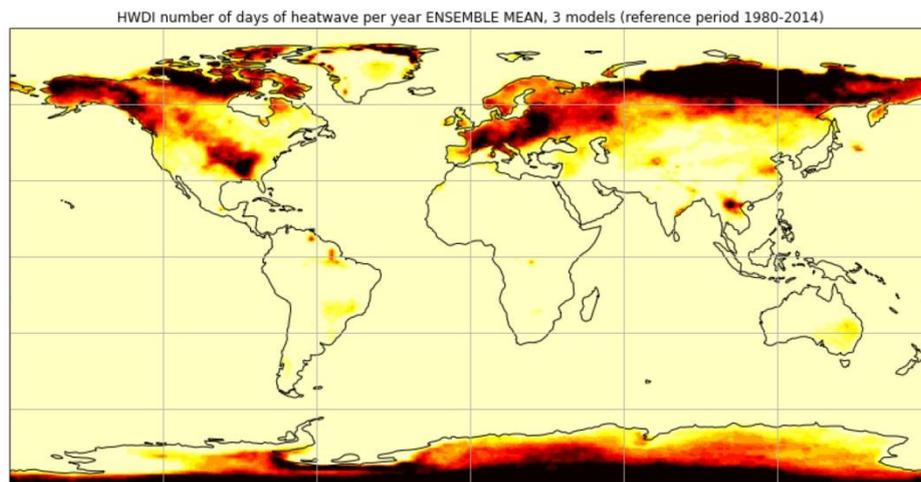
Per l'Europa si hanno valori che vanno dai 2 ai 5 giorni di ondata di calore l'anno, soprattutto per la Scandinavia.

Per la parte più meridionale del Sud America, di alcune zone dell'Asia centrale e dell'Australia sud-orientale, viene riscontrato circa 1 giorno di ondata di calore l'anno.

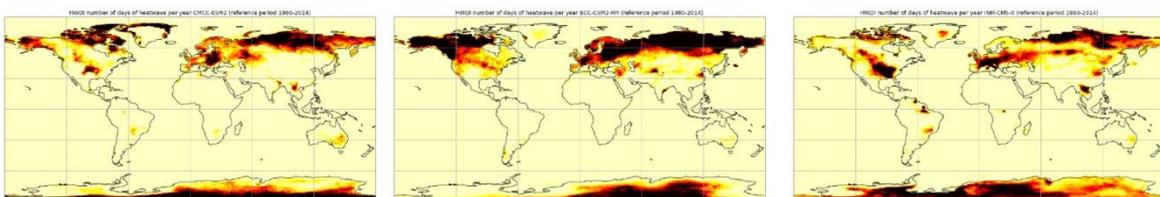
La rappresentazione dei giorni di ondate di calore simulati dall'ensemble dei modelli (FIG.5 B) mostra valori vicini ai 15 giorni annui sull'Alaska, Nord del Canada e Stati Uniti centrali, così come per gran parte dell'Europa (in particolare tra Nord Italia e Francia ed Est Europa) e buona parte della Siberia. Un numero abbastanza elevato dell'indice si ha in prossimità del Laos, con picchi di giorni di ondata di calore superiori a 15 l'anno.



(A)



(B)



(C)

FIG.5 - Numero di giorni di ondata di calore l'anno per il periodo storico 1980-2014 (HWDI) considerando la reanalisi ERA5 (A), la media di ensemble (B) ed i singoli modelli: CMCC-ESM2(C), BCC-CSM2-MR (D), INM-CM5-0(E).

Analizzando le prestazioni dei modelli climatici nel simulare i giorni di ondata di calore l'anno (HWDI) sul periodo storico 1980-2014, in confronto ad ERA5, emerge, secondo l'ensemble dei tre modelli (FIG.6 A), una sovrastima dei giorni di ondate di calore, con picchi del valore del bias (positivo) di +10 su Alaska e parte del Nord America (in particolare la parte centrale), su gran parte d'Europa (in particolare centro-orientale) e nord della Siberia, nonché lungo le coste nord e occidentali della Groenlandia.

Tra l'Asia occidentale e l'Europa orientale si hanno, invece, valori di bias negativi, così come per la parte più a nord del Canada e alcune zone del nord dell'Antartide, ma per il resto di tale regione si hanno valori di bias principalmente positivi (con picchi di +10).

Un bias positivo si ha anche in prossimità del Laos, nella parte nord-occidentale della Cina (meno forte) e in zone circoscritte tra Venezuela e Brasile (per la parte meridionale di quest'ultima regione è inoltre riscontrabile un bias positivo di inferiore entità). Un bias positivo non particolarmente elevato lo si ha anche sull'Australia sud-orientale e est dell'India.

Confrontando il singolo modello BCC-CSM2-MR con ERA5 (FIG.6 B), si ha un bias maggiormente positivo sul nord-ovest del Nord America. Bias positivo, ma meno intenso per la parte centrale del Nord America. Presenza di bias leggermente negativo a livello degli Stati Uniti centrali e gran parte della Russia.

Rispetto alla media di ensemble non si hanno più bias positivi in Sud America e nel Sud Est Asiatico, così come lungo le coste nord e occidentali della Groenlandia. Inoltre, un bias positivo più forte è presente nella parte occidentale del Medio Oriente, a livello di alcune zone dell'Asia Occidentale e nord est della Cina.

Il modello CMCC-ESM2 sembrerebbe quello con le migliori prestazioni nel simulare sul periodo storico il numero di giorni di ondata di calore l'anno (FIG.6 C) A livello dell'Europa si ha una generale sovrastima, ma in misura minore rispetto agli altri modelli e alla media di ensemble (al contrario bias positivo più elevato a livello dell'Est Europa). Per quanto riguarda il Nord America il modello presenta valori di bias meno elevati, anche se si nota una sovrastima a livello degli Stati Uniti, con picchi di +10, su un'area comunque meno vasta. Risultano inoltre bias positivi piuttosto intensi lungo le coste nord e occidentali della Groenlandia parte dell'Alaska e del Canada settentrionale, su quest'ultimo si ha anche la presenza di bias negativi. Per tale modello è, inoltre, presente un bias negativo, con picchi di -10, sulla parte più occidentale della Russia.

Considerando invece il modello INM-CM5-0 in confronto alla reanalisi (FIG.6 D), rispetto all'ensemble dei modelli, emerge un bias negativo, ma non particolarmente elevato, a livello del Nord America settentrionale (con picchi di -10) e un bias maggiormente negativo su gran parte della Russia. In determinate zone di quest'ultima regione si ha però una sovrastima del numero di giorni di ondate di calore con bias positivi anche piuttosto elevati. A livello del Nord America centrale e in particolare sugli Stati Uniti centrali si ha un bias positivo, con picchi superiori a +10. Su gran parte dell'Europa si ha una sovrastima dei giorni di ondata di calore, ma si hanno bias negativi (non molto elevati) su parte della Scandinavia. Bias maggiormente positivi emergono su alcune zone tra Brasile e Venezuela e si ha una sovrastima (maggiore dell'ensemble) dei giorni di ondata di caldo a livello del Laos (Sud Est Asiatico), così come (in misura minore) a livello della Groenlandia centro-orientale.

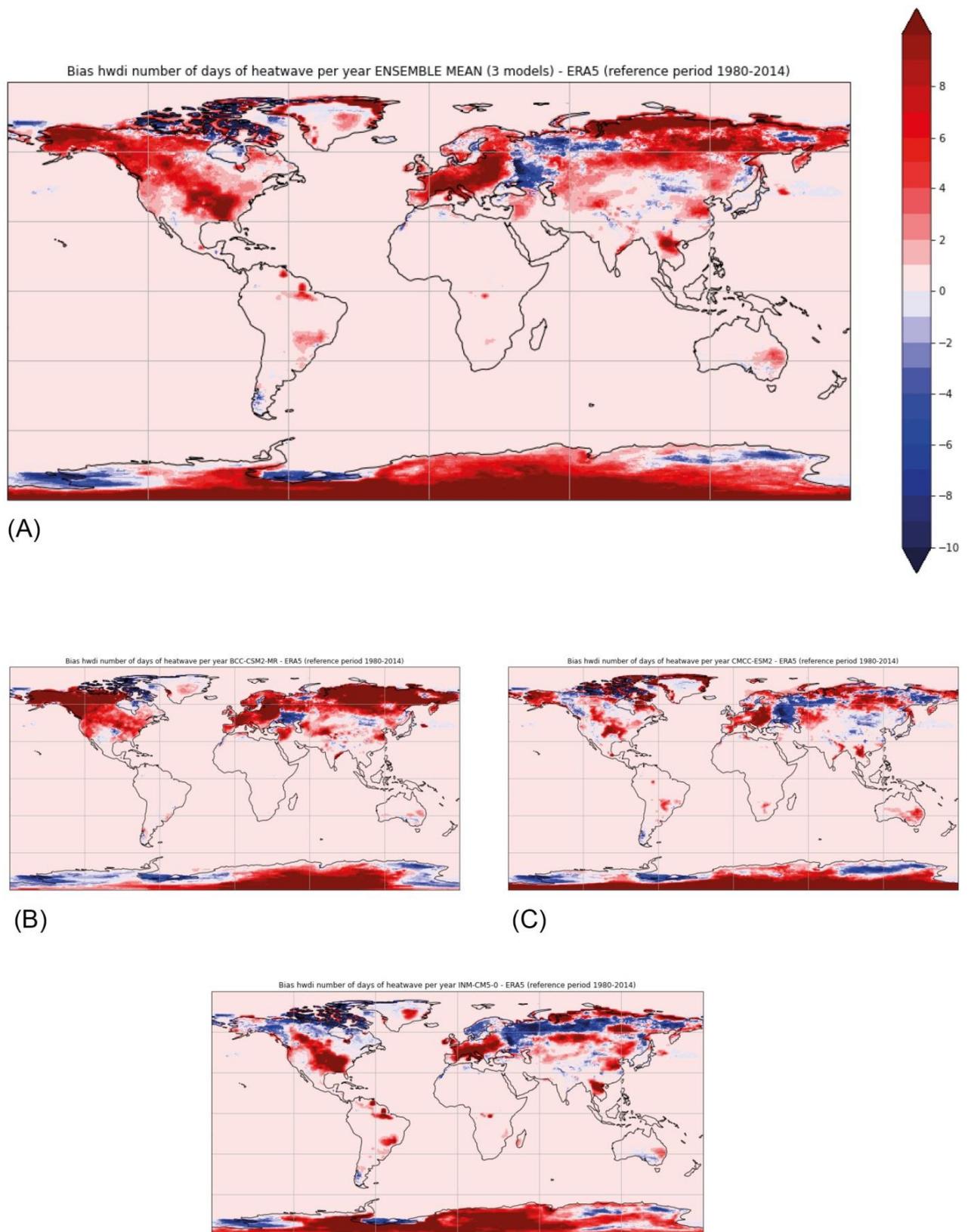


FIG.6 - Mappe che rappresentano il bias (discostamento dei risultati della simulazione dei modelli dalla reanalisi, misura delle prestazioni) relativo alla simulazione del numero di giorni di ondata di calore l'anno (HWDI) considerando la media di ensemble (A) e i singoli modelli BCC-CSM2-MR (B), CMCC-ESM2 (C), INM-CM5-0 (D).

3.4 PROIEZIONI FUTURE DELLE ONDATE DI CALORE

Si prendono in considerazione le proiezioni future inerenti al numero di giorno di ondate di calore l'anno a livello globale, indice HWDI, calcolato sulla base del superamento di 5 gradi per almeno 6 giorni consecutivi della soglia del 90° percentile delle temperature massime giornaliere del periodo futuro 2066-2100 (FIG.7 A). Dapprima, analizzando le proiezioni della media di ensemble dei modelli selezionati, per quanto riguarda le alte latitudini dell'emisfero boreale, si hanno i valori più elevati dell'indice (in particolare sulle terre emerse), con un numero di giorni maggiore di 15 l'anno per gran parte della Russia, in particolare per la Siberia e per parte della Russia occidentale.

Si hanno 5 giorni l'anno di ondata di calore per le coste della Groenlandia, ma valori anche maggiori di 15 giorni l'anno in alcune zone della stessa. Per la parte più settentrionale del Canada e gran parte dell'Alaska vengono simulati più di 10 giorni di ondata di calore l'anno (con picchi intorno ai 15 giorni l'anno). Per varie zone del Canada centro-occidentale, invece, vengono simulati tra i 6 ed i 9 giorni di ondata di calore l'anno. Mentre, per quel che riguarda le alte latitudini dell'emisfero australe, vengono simulati giorni di ondate di calore l'anno maggiori di 10 per gran parte dell'Antartide, con picchi anche di oltre 15 giorni in alcune zone della stessa.

Per quel che riguarda l'Europa, emerge un numero di giorni di ondata di calore l'anno piuttosto elevato per la penisola scandinava, maggiori di 10 (con picchi di 15 giorni l'anno). Intorno ai 10 giorni invece per quel che riguarda l'Europa centrale e orientale, con valori anche superiori ai 12 giorni l'anno per alcune zone della Francia (picchi di 15 l'anno), e gran parte dell'Est Europa, così come per Irlanda e Gran Bretagna (in particolare parte occidentale), valori più bassi invece per l'Europa meridionale.

Rimanendo alle medie latitudini, più di 10 giorni di ondata di calore l'anno vengono simulati, inoltre, per gli Stati Uniti centro-orientali, con picchi di 15 giorni.

Valori fino a 8 giorni di ondata di calore l'anno vengono, invece, simulati per la Cina nord-orientale e di 4-5 giorni per la Mongolia.

Per quanto riguarda le zone tropicali, si hanno valori fino a 5-6 giorni l'anno simulati in alcune zone del Sud America centro-settentrionale e fino anche a 8-9 giorni l'anno a livello dell'India nord-orientale e in prossimità del Laos. Circa 2 giorni di ondata di calore l'anno vengono simulati anche per l'Australia sud-orientale e parte del Madagascar.

Il modello BCC-CSM2-MR (FIG.7 B) simula un numero più importante di giorni di ondata di calore l'anno sul Nord America nord-occidentale, picchi di 15 giorni per l'Alaska e nord del Canada. Per la parte centro-occidentale del Canada vengono simulati più di 8 giorni di ondata di calore, mentre per la parte sud-orientale valori intorno ai 4 giorni, picchi maggiori di 6 giorni l'anno.

Il modello CMCC-ESM2 simula meno giorni di ondata di calore l'anno rispetto alla media di ensemble, con valori di 4-8 giorni per quanto riguarda l'Alaska e di 10-15 per quanto riguarda la parte più settentrionale del Canada. Per quanto riguarda il resto del Canada vengono simulati meno giorni di ondata di calore l'anno.

Il modello INM-CM5-0 (FIG.7 D), invece, simula per l'Alaska da 2 a 8 giorni di ondata di calore l'anno. Per una parte settentrionale del Canada vengono simulati anche più di 5 giorni, con picchi di 15 giorni l'anno su una zona meno vasta rispetto a quanto simulato dagli altri singoli modelli e dall'ensemble dei modelli.

In alcune zone del Canada centro-meridionale, però, vengono simulati da 10 a 15 giorni l'anno di ondata di calore.

Per quel che riguarda altre zone continentali delle alte latitudini dell'emisfero boreale, valori maggiori anche di 15 giorni l'anno vengono simulati da BCC-CSM2-MR per le coste della Groenlandia (ad eccezione delle coste meridionali), per la Scandinavia e per buona parte della Russia.

CMCC-ESM2 (FIG.7 C) invece simula, a livello di alcune zone della Groenlandia, anche oltre 15 giorni di ondata di calore l'anno, in altre valori molto bassi, prossimi allo 0.

Inoltre, simula più di 8 giorni di ondata di calore su gran parte della Scandinavia, con picchi anche di 15 giorni l'anno nella parte meridionale, mentre valori più bassi (meno di 5 giorni l'anno) per la parte nord-orientale. Quest'ultimo modello, inoltre, simula per parte della Russia occidentale e gran parte della Siberia oltre 15 giorni di ondata di calore, per il resto della Russia oltre i 7 giorni, ad eccezione della parte nord-occidentale e parte di quella nord-orientale, in cui vengono simulati 3-4 giorni di ondata di calore l'anno.

INM-CM5-0, invece, simula più di 6 giorni di ondata di calore l'anno su gran parte della Scandinavia, ad eccezione della parte nord-orientale (2-3 giorni l'anno). Analogamente a CMCC-ESM2, simula per gran parte della Russia occidentale e della Siberia (su una zona più vasta) un numero di giorni di ondata di calore anche maggiore di 15 giorni l'anno, ad eccezione della parte nord-occidentale e nord-orientale (2-3 giorni l'anno).

Per quanto riguarda le alte latitudini dell'emisfero australe, secondo BCC-CSM2-MR, vengono simulati anche più di 8 giorni di ondata di calore l'anno in una zona dell'Antartide centro-orientale, mentre CMCC-ESM2 simula per l'Antartide dai 3 ai 12 giorni di ondata di calore, con picchi anche maggiori per la parte orientale e meridionale (anche oltre i 15 giorni).

INM-CM5-0 simula per l'Antartide i numeri di giorni più elevati per la parte meridionale e orientale, con picchi anche maggiori di 15 giorni l'anno.

Per quel che riguarda le medie latitudini, invece, BCC-CSM2-MR simula più di 8 giorni di ondata di calore l'anno per il Nord America centro-orientale, picchi di 5 giorni l'anno per le coste occidentali. CMCC-ESM2 simula, invece, anche oltre 15 giorni di ondata di calore l'anno per gli Stati Uniti centrali e tra gli 8 e i 15 giorni per parte degli Stati Uniti occidentali, mentre INM-CM5-0 simula più di 10 giorni per la parte centrale e sud-orientale con picchi maggiori di 15 giorni l'anno.

BCC-CSM2-MR simula oltre 10-12 giorni di ondata di calore l'anno per l'Europa centrale e orientale e gran parte di Irlanda e Gran Bretagna, con picchi di oltre 15 giorni per la Francia, mentre CMCC-ESM2 vede più di 7 giorni di ondata di calore l'anno per gran parte dell'Europa centrale e orientale, con picchi intorno i 15 giorni per parte di Irlanda e Gran Bretagna, Francia centrale, Nord Italia e parte dei Balcani. Numero di giorni l'anno minore per l'Europa meridionale.

INM-CM5-0, invece, simula più di 10 giorni di ondata di calore l'anno per l'Europa centrale, con picchi anche maggiori di 12 giorni l'anno tra Germania e Francia e tra Gran Bretagna e Irlanda.

BCC-CSM2-MR simula oltre 8 giorni di ondata di calore l'anno per la Turchia e picchi di 15 giorni per le coste orientali del Mediterraneo. Più di 4-5 giorni di ondata di calore l'anno vengono simulati in alcune zone centro-occidentali dell'Asia e Cina nord-orientale.

CMCC-ESM2 vede, invece, intorno a 3 giorni di ondata di calore l'anno per parte del Medio Oriente e in alcune zone dell'Asia centro-orientale (picchi maggiori di 6 giorni), per il resto valori prossimi allo zero.

Mentre INM-CM5-0 vede anche più di 15 giorni a livello della Cina nord-orientale.

Meno giorni di ondata di calore vengono simulati da BCC-CSM2-MR e CMCC-ESM2 per quanto riguarda le zone tropicali. Per tali zone il primo simula più di 10 giorni di ondata di calore l'anno per le coste nord-orientali dell'India e intorno ai 4 giorni per l'Australia sud-orientale. Il secondo simula anche oltre 15 giorni l'anno per le coste nord-orientali dell'India, oltre 10 giorni per il Laos e da 10 a 15 giorni per Brasile meridionale ed una parte nord-occidentale.

INM-CM5-0 simula, per il Laos anche oltre i 15 giorni di ondata di calore l'anno, invece, in alcune zone della parte settentrionale del Sud America e in una zona dell'Africa centrale equatoriale 10-12 giorni e intorno ai 4 giorni a livello del Madagascar. Infine, tale modello simula circa 2 giorni l'anno in alcune zone dell'Australia meridionale e in alcune zone del Sud America orientale.

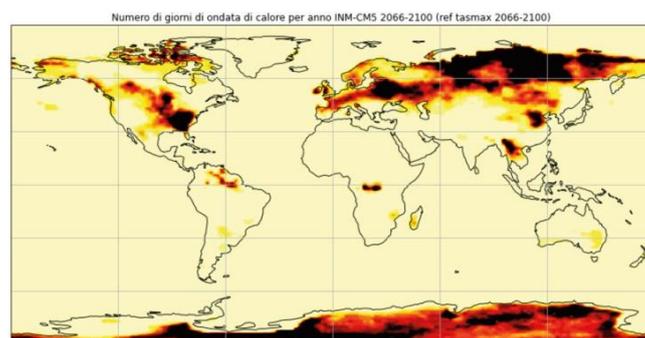
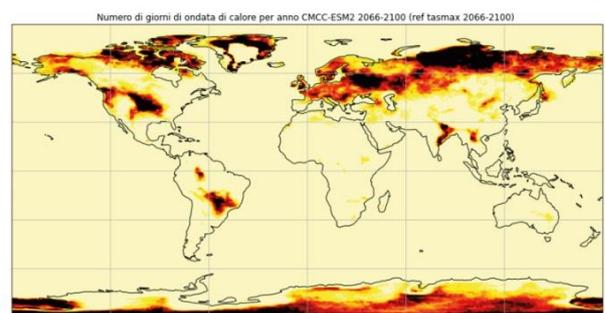
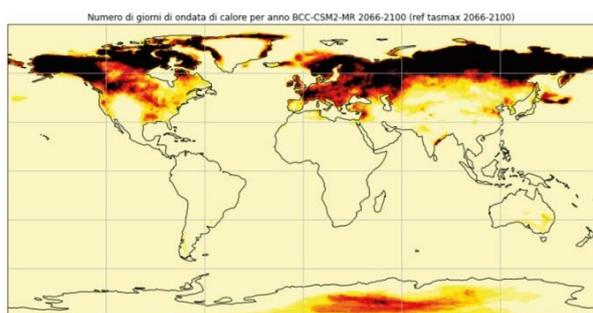
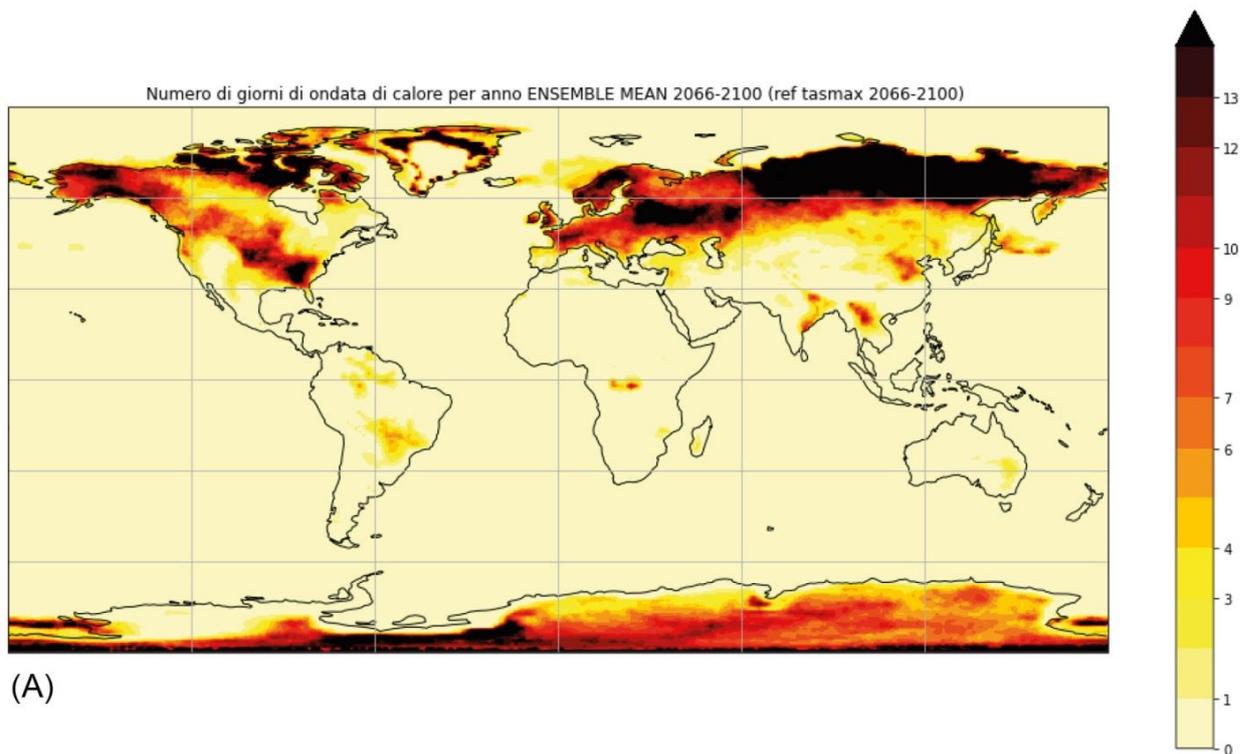


FIG.7 - Proiezione del numero di giorni di ondata di calore l'anno per quanto riguarda il periodo futuro 2066-2100 (HWDI) calcolato utilizzando come soglia il 90° percentile delle temperature massime giornaliere del periodo 2066-2100 per quanto riguarda la media di ensemble (A) e i singoli modelli BCC-CSM2-MR (B), CMCC-ESM2 (C), INM-CM5-0 (D).

L'indice HWDI calcolato per il periodo futuro, utilizzando come soglia il 90° percentile delle temperature massime giornaliere del periodo 2066-2100, rispetto all'indice calcolato per il periodo storico, è maggiore in determinate zone del pianeta (aumento di giorni di ondata di calore l'anno) e minore in altre (diminuzione di giorni di ondata di calore l'anno), sia secondo l'ensemble, che i singoli modelli.

Prendendo in esame la mappa che mostra le differenze di giorni di ondata di calore l'anno tra futuro e passato per la media di ensemble (FIG.8 A), emerge un aumento anche di oltre 5 giorni l'anno per l'Alaska meridionale e una diminuzione di oltre di 5 giorni per l'Alaska nord-occidentale. Per quanto riguarda il Canada nord-occidentale, invece, si ha una generale diminuzione, mentre per il Canada nord-orientale si ha un aumento dei giorni di ondata di calore anche di 10 giorni l'anno.

Per la Groenlandia si hanno determinate zone (ad esempio parte nord-orientale) in cui si ha una diminuzione di giorni e altre in cui si ha anche un notevole aumento.

Emerge inoltre un aumento fino ad oltre 8 giorni di ondata di calore l'anno su gran parte della Scandinavia e buona parte di Gran Bretagna e Irlanda, così come per parte della Russia occidentale e gran parte della Siberia (picchi di aumenti di oltre 10 giorni l'anno di ondata di calore). Per alcune zone circoscritte dalla Russia, comunque, si ha una leggera diminuzione relativa all'indice.

Per gran parte della regione antartica si ha una diminuzione del numero di giorni di ondata di calore l'anno (picchi di oltre 10 giorni in meno), ma in alcune zone si ha un aumento.

Per quanto riguarda le medie latitudini, si ha un aumento del numero di giorni di ondata di calore l'anno per gli Stati Uniti sud-orientali (con picchi di 10 giorni in più l'anno), così come per gli Stati Uniti centro-settentrionali e occidentali (aumento del numero di giorni di ondata di calore meno intenso). Si ha, invece, una diminuzione di 8 giorni l'anno per quanto riguarda una parte degli Stati Uniti centro-meridionali.

Per l'Europa emerge, invece, una diminuzione dei giorni di ondata di calore per la parte meridionale (ad eccezione della Grecia, in cui si ha un aumento) fino a 10 giorni di ondata di calore in meno l'anno. Discreto aumento, intorno ai 5 giorni in più di ondata di calore l'anno, per la Cina nord-orientale.

Considerando le regioni tropicali, si ha un leggero aumento del numero dei giorni di ondata di calore l'anno per il Brasile meridionale e parte del Sud America settentrionale (3-4 giorni di ondata di calore in più l'anno), ma si ha una diminuzione del numero di giorni in alcune zone del Sud America settentrionale (3-4 giorni in meno l'anno). Aumento anche di oltre i 8 giorni l'anno per India orientale e Birmania e una zona dell'Africa centrale equatoriale, mentre una diminuzione in prossimità del Vietnam del Nord (anche di oltre 8 giorni in meno l'anno).

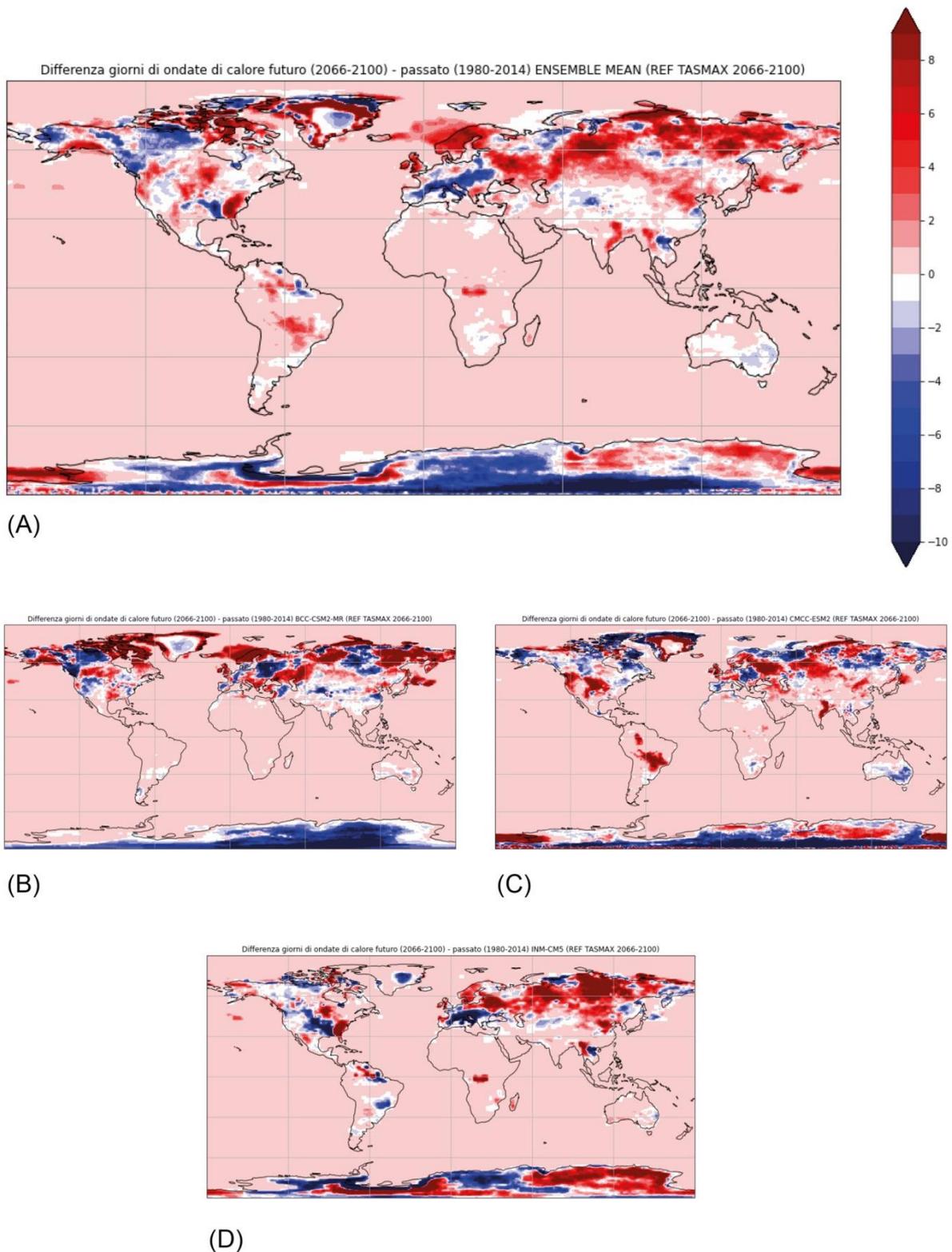


FIG.8 - Differenza tra il numero di giorni di ondata di calore l'anno simulato per il periodo futuro (2066-2100, soglia: 90° percentile tasmax 2066-2100) e il numero di giorni di ondata di calore l'anno per il periodo storico (1980-2014) considerando la media di ensemble dei 3 modelli (A), e i 3 modelli singoli: BCC-CSM2-MR (B), CMCC-ESM2 (C), INM-CM5-0 (D).

Se si considera l'indice HWDI calcolato considerando le temperature massime giornaliere 2066-2100 e come soglia il 90° percentile delle temperature massime giornaliere 1980-2014, il numero di giorni di ondata di calore l'anno aumenta notevolmente.

Secondo la media di ensemble dei tre modelli (FIG.9 A), si hanno fino ad oltre 200 giorni di ondata di calore l'anno per il Nord America centro-occidentale, più di 100 giorni per il Nord America settentrionale, 40-80 giorni per gli Stati Uniti orientali, mentre dai 60 ai 100 giorni l'anno per il Messico. L'ensemble dei modelli, inoltre, simula un numero di ondata di calore l'anno intorno ai 200 giorni per l'Europa centrale, meridionale e orientale, la parte più settentrionale dell'Africa e gran parte del Medio Oriente (ad eccezione della parte meridionale della penisola arabica, numero di giorni l'anno notevolmente inferiore), Russia settentrionale e Asia centro-occidentale. Vengono simulati 60-80 giorni l'anno per la Cina nord-orientale, mentre circa 10-20 giorni l'anno per quanto riguarda la parte meridionale. Per l'India vengono simulati circa dai 20 (principalmente lungo le coste) ai 60 (nell'entroterra) giorni di ondata di calore l'anno e circa 50-70 giorni l'anno per l'Asia sud-orientale. L'ensemble dei modelli, inoltre, vede circa 10-20 (con picchi di 50) giorni l'anno per l'Africa equatoriale.

Per quanto riguarda l'emisfero australe, emerge un numero di giorni di ondata di calore l'anno di 200 giorni (anche oltre) per il Sud America nord-orientale, parte dell'Africa meridionale e buona parte dell'Antartide, mentre per l'Australia si hanno invece circa 20-30 giorni l'anno di ondata di calore (con picchi di 50 giorni l'anno per la parte nord-occidentale).

Considerando i singoli modelli, BCC-CSM2-MR (FIG.9 B) simula 200 giorni (ed oltre) di ondata di calore l'anno per quel che riguarda Stati Uniti centro-occidentali e parte del Canada nord-occidentale e dell'Alaska (nel resto del Canada occidentale e dell'Alaska valori comunque superiori ai 150 giorni), mentre vengono simulati circa 50-100 giorni l'anno per il Nord America nord-orientale.

Tale modello simula per l'area mediterranea circa 200 giorni di ondata di calore l'anno, ad eccezione del Nord Africa orientale con un numero di giorni intorno ai 60 l'anno. Per l'Europa settentrionale si hanno valori minori, 50-80 giorni l'anno di ondata di calore.

Mentre per la Siberia vengono simulati 200 giorni di ondata di calore l'anno (anche oltre), per la parte occidentale della Russia le proiezioni vedono meno di 100 giorni di ondata di calore l'anno. Più di 100 giorni l'anno simulati per gran parte del Medio Oriente, ad eccezione della penisola arabica meridionale, con meno di 20 giorni di ondata di calore l'anno. Per l'Asia sud-orientale (compresa l'Asia tropicale) questo modello prevede da 0 a 20 giorni di ondata di calore l'anno, valori simili per le coste dell'India, mentre per l'entroterra indiano vengono simulati valori anche maggiori di 100 giorni l'anno.

Per quanto riguarda le altre regioni tropicali, tale modello simula anche oltre 200 giorni l'anno di ondata di calore per parte del Sud America nord-orientale (inclusa regione amazzonica), per il resto del Sud America, invece, le proiezioni vedono meno di 30 giorni l'anno. Anche per il Sud Africa vengono previsti meno di 30 giorni di ondata di calore l'anno.

Viene inoltre simulato un numero di giorni l'anno di ondata di calore prossimo allo 0 per l'Africa tropicale dell'emisfero boreale e buona parte dell'America centrale (escluso il Messico, 30-100 giorni l'anno). Oltre 100 giorni di ondata di calore l'anno simulati anche per la parte più meridionale dell'Antartide (con picchi di 200 giorni l'anno).

Il modello INM-CM5-0 (FIG.9 D) simula, invece, circa 200 giorni l'anno di ondata di calore e oltre i 200 per il Nord America centro-occidentale, mentre da 20 a 60 giorni per il resto del Nord America, con picchi di 200 giorni l'anno per la parte più nord-orientale del Canada.

Per una zona dell'entroterra della Groenlandia e in prossimità delle coste sud-orientali si ha un numero di giorni l'anno di 200 giorni circa, ma valori prossimi allo 0 sul resto della stessa.

Per le regioni mediterranee si hanno 200 (e oltre) giorni di ondata di calore l'anno, mentre circa 50 giorni per l'Europa settentrionale e 100-150 per l'Europa centrale e orientale.

Tale modello, inoltre, simula anche più di 150 giorni l'anno per quel che riguarda l'Asia occidentale e la sua parte più settentrionale, con picchi di 200 giorni l'anno, meno di 50 giorni l'anno per l'Asia orientale e meno di 20 per l'Asia tropicale e Australia.

In generale ai tropici, questo modello simula un numero di giorni l'anno di ondata di calore prossimo allo 0 (così come per la Nuova Zelanda), ma valori anche di 150-200 per parte dell'Africa meridionale e Sud America orientale. Per l'Antartide, tale modello simula un numero di giorni l'anno di ondata di calore piuttosto eterogeneo, con zone il cui numero è prossimo allo 0 e zone in cui si hanno picchi anche superiori a 200 giorni l'anno. Sugli oceani non vengono simulati giorni di ondata di calore, ad eccezione di alcune zone del Pacifico settentrionale e alcune zone dell'Oceano Artico (a nord di Europa e Asia, con picchi maggiori di 200 giorni l'anno).

Le proiezioni future per il modello CMCC-ESM2 (FIG.9 C) vedono oltre i 200 giorni l'anno di ondata di calore per il Nord America occidentale (per il Nord America orientale 50-100, mentre dai 100 ai 200 per il Messico), gran parte d'Europa e area mediterranea, compresa parte più settentrionale dell'Africa e Medio Oriente (ad eccezione della parte meridionale della penisola arabica, meno di 50 giorni l'anno).

Tale modello simula, inoltre, un numero di giorni maggiore di 200 per tutto l'Artico (ad eccezione di una zona della Groenlandia) e per il Pacifico settentrionale. Per l'Asia occidentale, questo modello simula più di 200 giorni l'anno di ondata di calore, mentre per l'Asia orientale un numero di giorni piuttosto inferiore (dai 20 della Cina meridionale, ai 50-80 della Cina settentrionale e Giappone, fino tra i 100 e i 200 della Russia orientale). Anche per tale modello per le regioni tropicali-equatoriali vengono simulati meno giorni l'anno di ondata di calore, ad eccezione della regione amazzonica, gran parte del Sud America settentrionale (valori di 200 e più giorni l'anno), così come alcune zone dell'India (entroterra) e alcune zone del Sud-est asiatico. Valori vicini o superiori ai 200 giorni anche per gran parte del Sud Africa. Per l'Australia vengono simulati da 20 a 50 giorni l'anno di ondata di calore con valori maggiori per la parte occidentale. Per l'Antartide meridionale vengono simulati oltre 200 giorni l'anno.

Questo notevole aumento del numero di giorni di ondata di calore (valore dell'indice HWDI) si spiega poiché si ha un generale aumento delle temperature massime giornaliere per il periodo futuro 2066-2100 rispetto al periodo storico 1980-2014, così come precedentemente descritto, secondo lo scenario emissivo ssp5-8.5. Si nota un gradiente latitudinale dall'equatore verso i poli, con zone in cui il riscaldamento è anche maggiore di 5°C, fino ad un riscaldamento relativo alle temperature massime di 10°C (e oltre) in alcune zone dell'Artico. Per cui, considerando come soglia il 90° percentile calcolato considerando le temperature massime giornaliere del periodo storico, il superamento di 5°C per più di 6 giorni consecutivi di tale soglia delle temperature massime del periodo 2066-2100, è molto più probabile e frequente e quindi il valore dell'indice HWDI (numero di giorni di ondata di calore l'anno) è notevolmente maggiore.

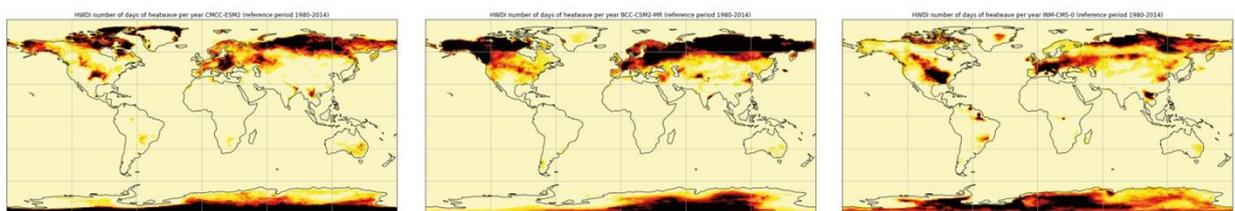
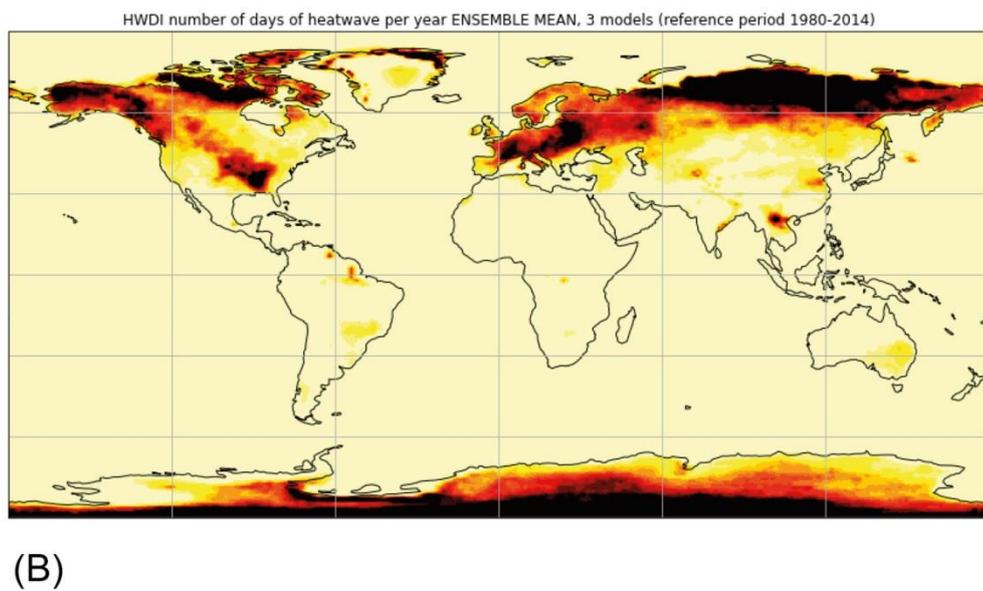
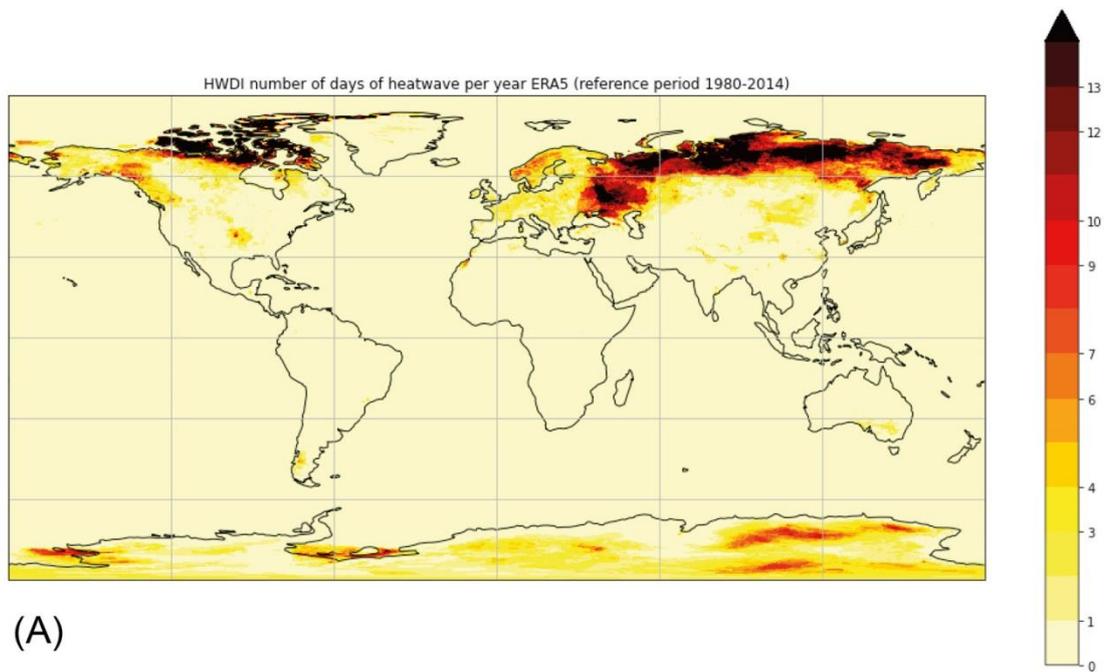


FIG.9 - Proiezione del numero di giorni di ondata di calore l'anno per quanto riguarda il periodo futuro 2066-2100 (HWDI) calcolato utilizzando come soglia il 90° percentile delle temperature massime giornaliere del periodo 1980-2014 per quanto riguarda la media di ensemble (A) e i singoli modelli BCC-CSM2-MR (B), CMCC-ESM2 (C), INM-CM5-0 (D).

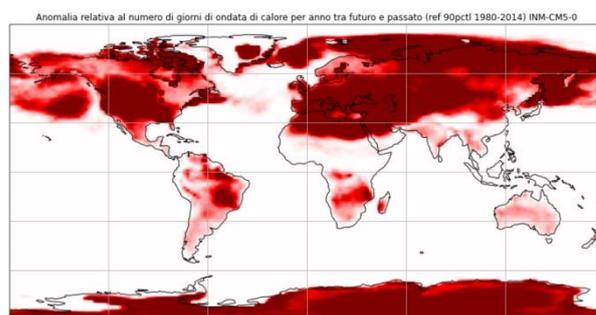
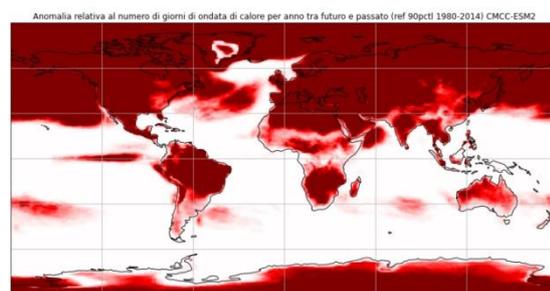
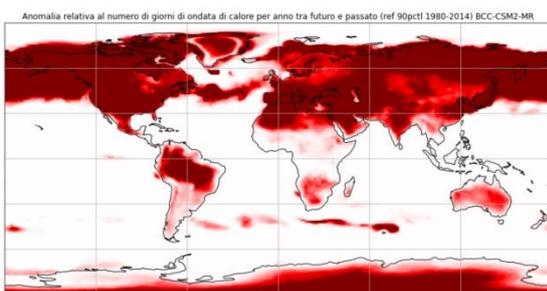
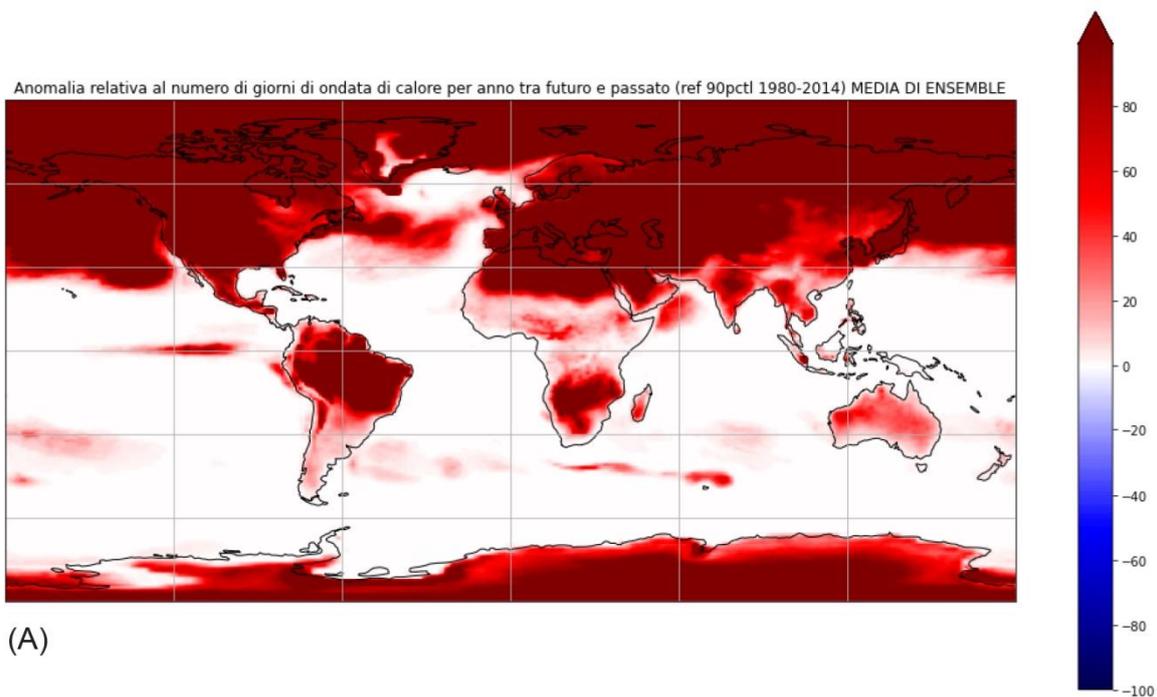


FIG.10 - Differenza tra il numero di giorni di ondata di calore l'anno simulato per il periodo futuro (2066-2100, soglia: 90° percentile tasmax (1980-2014) e il numero di giorni di ondata di calore l'anno per il periodo storico (1980-2014) considerando la media di ensemble dei 3 modelli (A), e i 3 modelli singoli: BCC-CSM2-MR (B), CMCC-ESM2 (C), INM-CM5-0 (D).

4 DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

Nel complesso, analizzando le performance dei modelli climatici nel simulare le temperature massime per il periodo storico considerato, emergono buone prestazioni per quanto riguarda gli oceani rispetto alle terre emerse.

In generale la media di ensemble, rispetto ai tre singoli modelli, tende a simulare meglio le temperature massime e sembra parzialmente correggere i bias alle alte latitudini (i singoli modelli tendono ad avere delle prestazioni peggiori su tali aree, in particolare sull'Artico).

Le prestazioni peggiori nella simulazione di tale variabile si hanno per le regioni di alta quota, sia per quanto riguarda l'ensemble, che i singoli modelli.

Inoltre emerge una generale sovrastima nelle simulazioni delle temperature massime a livello di importanti correnti oceaniche.

In generale il modello CMCC-ESM2 sembra avere le prestazioni migliori, anche se sull'Artico tende a sovrastimare notevolmente le temperature massime e questo è legato alla sottostima della copertura di ghiaccio marino da parte di tale modello.

Invece il modello INM-CM5-0 tende principalmente a sottostimare le temperature massime (ad eccezione di alcune zone come l'area mediterranea).

Per quanto riguarda l'anomalia relativa alle temperature massime per il periodo futuro 2066-2100 rispetto al periodo storico (1980-2014), il modello CMCC-ESM2 mostra il maggiore incremento delle temperature massime, in particolare alle alte latitudini dell'emisfero boreale, rispetto alla media di ensemble e agli altri singoli modelli.

C'è un sostanziale accordo tra i modelli relativamente ad un aumento delle temperature massime a livello globale, anche se INM-CM5-0 mostra un incremento inferiore rispetto agli altri.

Il modello BCC-CSM2-MR, invece, risulta essere il modello che simula l'incremento relativo alle temperature massime a livello globale in modo più simile alla media di ensemble.

In generale per l'emisfero settentrionale, in particolare per le regioni continentali, viene simulato un riscaldamento maggiore.

Si può inoltre notare un certo gradiente latitudinale (dalle basse alle alte latitudini) relativo all'incremento delle temperature massime, via via maggiore andando verso le alte latitudini.

Inoltre sugli oceani le temperature massime risultano aumentare in maniera meno importante (in accordo con il fatto che gli oceani presentano un'inerzia termica molto maggiore rispetto all'atmosfera). Fa eccezione l'Oceano Artico in cui l'incremento relativo alle temperature massime è notevolmente maggiore.

Considerando la valutazione dei modelli relativamente alla simulazione del numero di giorni di ondata di calore (indice HWDI), emerge che il modello BCC-CSM2-MR sembrerebbe avere le prestazioni peggiori (sia rispetto agli altri modelli, che alla media di ensemble), sovrastimando l'indice (HWDI) per quel che riguarda le zone maggiormente interessate da ondate di calore (come definite in tale studio),

Anche l'ensemble dei modelli non sembrerebbe avere buone prestazioni nel simulare le ondate di calore, tendendo alla sovrastima del numero di giorni di ondata di calore l'anno soprattutto per la parte più centro-settentrionale della Siberia e gran parte della Russia orientale, per l'Europa centrale e orientale, per il Nord America centrale e l'Alaska, e per la regione antartica.

INM-CM5-0 tende a sovrastimare il numero di giorni di ondata di calore in determinate regioni, ma rispetto agli altri modelli emerge una sottostima per alcune zone del Nord America settentrionale, Russia e leggera sottostima per la Scandinavia.

In generale la media di ensemble non sembrerebbe colmare più di tanto gli errori dei singoli modelli e addirittura il singolo modello del CMCC-ESM2 sembrerebbe da solo mostrare delle prestazioni migliori, sia rispetto agli altri modelli, sia rispetto all'ensemble (in particolare per Nord America e l'Europa centro-meridionale). Il fatto che tale modello singolo abbia prestazioni migliori rispetto alla media di ensemble è anche dovuto al ristretto numero di modelli utilizzati come membri dell'ensemble.

Dalla proiezione dei giorni di ondata di calore l'anno per il periodo futuro, utilizzando come soglia il 90° percentile delle tasmax 2066-2100, il modello BCC-CSM2-MR mostra i valori più elevati, in particolare per le alte latitudini dell'emisfero boreale, maggiori anche alla media di ensemble dei tre modelli considerati in tale studio. Nel dettaglio valori più elevati si hanno per Russia nord-occidentale, Alaska e la parte più settentrionale del Canada, così come gran parte d'Europa (soprattutto Scandinavia). Tale modello, anche per il periodo storico, simula i valori più elevati, ma, rispetto al periodo 1980-2014, le proiezioni future (soglia:90° percentile 2066-2100) mostrano un numero di giorni l'anno meno elevato per Scandinavia e coste della Groenlandia, nonché in alcune regioni europee come la Gran Bretagna o l'Est Europa.

Secondo l'ensemble dei modelli si ha il maggior numero di giorni di ondata di calore l'anno per la Siberia, anche se bisogna considerare una certa sovrastima da parte dei modelli per la parte centro-settentrionale.

Per l'Europa centro-orientale emergono valori piuttosto elevati, ma anche in questo caso questi potrebbero essere influenzati da una sovrastima da parte dei modelli, mentre per la Scandinavia i risultati che vedono un numero di giorni l'anno abbastanza elevato, potrebbero essere più veritieri, considerando le migliori prestazioni dei modelli per tale regione.

Anche per Alaska e Stati Uniti nord-orientali emerge un numero di giorni di ondata di calore l'anno piuttosto elevato, ma anche in questo caso si dovrebbe considerare una sovrastima.

Per l'Antartide, dalle proiezioni per il periodo futuro della media di ensemble e dei singoli modelli relative al numero di giorni di ondata di calore l'anno, emergono valori piuttosto elevati, ma tali risultati, considerando le cattive prestazioni dei modelli per tale regione potrebbero essere poco attendibili.

Per quanto riguarda gli altri modelli il valore dell'indice HWDI risulta minore, sia rispetto a BCC-CSM2-MR, sia rispetto all'ensemble per Alaska, parte del Canada, Scandinavia e parte della Siberia.

Analizzando le mappe che mostrano le proiezioni dell'indice HWDI a livello globale, utilizzando come soglia il 90° percentile delle temperature massime 1980-2014 per la media di ensemble e dei singoli modelli, il numero di giorni di ondata di calore l'anno aumenta notevolmente.

Tra i modelli, CMCC-ESM2 mostra i valori più elevati su un'area maggiore (interessata da ondate di calore), questo giustificato dal fatto che tale modello vede un aumento relativo alle temperature massime maggiore a fine secolo rispetto al periodo 1980-2014, con temperature massime che sull'Artico possono arrivare ad essere anche di 10°C maggiori.

Il modello INM-CM5-0, invece, mostra i valori meno elevati su un'area meno vasta (ma comunque importanti), giustificato dal fatto che tale modello simula un aumento relativo alle temperature massime minore a fine secolo rispetto al periodo 1980-2014.

In generale emerge (tutti e 3 i modelli in accordo) un numero di giorni di ondata di calore notevolmente maggiore per l'area mediterranea, per il Nord America centrale e occidentale (centrale per INM-CM5-0), gran parte del Medio Oriente, parte settentrionale della Siberia e regione amazzonica (ad eccezione del INM-CM5, che vede in questa zona un numero di giorni di ondata di calore molto inferiore e in un'area meno vasta).

In conclusione, considerando le proiezioni relative all'indice HWDI, utilizzando come soglia il 90° percentile delle tasmax 2066-2100, non appare un aumento netto a livello globale, ma bisogna tenere conto che le temperature massime molto probabilmente aumenteranno (come visto dalle mappe descritte in precedenza) e gli impatti delle ondate di calore saranno comunque piuttosto importanti.

Considerando come soglia di riferimento il 90° percentile calcolato sul periodo 1980-2014 a livello globale, le proiezioni vedono un numero di giorni l'anno di ondata di calore notevole, nettamente superiore a quello relativo al periodo storico.

Dunque, appare chiaro come l'impatto di tali fenomeni in futuro (in questo caso prendendo in considerazione lo scenario ssp5-8.5, più pessimistico), a meno che non vengano prese importanti misure di adattamento e mitigazione, sarà notevole, in particolare per zone potenzialmente più soggette, come l'area mediterranea.

È necessario chiarire che anche per le regioni tropicali, per cui le proiezioni mostrano un numero di giorni l'anno di ondata di calore inferiore rispetto ad altre zone (eccezione regione amazzonica, per cui l'aumento è considerevole), è riscontrabile un incremento (accordo tra i tre modelli). Considerando la maggiore vulnerabilità di tali regioni all'aumento di giorni di ondata di calore, anche per queste andrebbero intraprese determinate azioni mirate ad attutire gli impatti che tali eventi potrebbero produrre.

SITOGRAFIA E BIBLIOGRAFIA

• Introduzione

- https://www.isprambiente.gov.it/files/pubblicazioni/statoambiente/SA_37_2013_indici_estremi.pdf
- IPCC_AR6_WGI_Chapter11, focus su 11.3 (Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate)
- CMIP6 MultiModel Evaluation of Present-Day Heatwave Attributes Annette L. Hirsch et al. (2021)
- “Climate hazard indices projections based on CORDEX-CORE, CMIP5 and CMIP6 ensemble” Erika Coppola et al. (2019)
- <https://www.climate.gov/maps-data/climate-data-primer/predicting-climate/climate-models>
- “Applied climatology: ‘heat waves’” Catherine Soucha and C.S.B. Grimmond (2004)
- “Changes in regional heatwave characteristics as a function of increasing global temperature” (S. E. Perkins-Kirkpatrick & P. B. Gibson), 2017
- “A review on the scientific understanding of heatwaves—Their measurement, driving mechanisms, and changes at the global scale” (Sarah E. Perkins), 2015
- Hotspots for warm and dry summers in eastern Europe, with a focus on Romania, Viorica Nagavciuc et al., 2021
- Current and projected regional economic impacts of heatwaves in Europe David García-León, Ana Casanueva, Gabriele Standardi, Annkatrin Burgstall, Andreas D. Flouris & Lars Nybo (2021)
- Impacts of heat waves and corresponding measures: a review, JianZuo et al. (2015)
- Measuring Heatwaves and Their Impacts, Benjamin Disher et al. (2021)
- <https://www.c2es.org/content/heat-waves-and-climate-change/>
- <http://etccdi.pacificclimate.org>
- Extreme heat waves under 1.5°C and 2°C global warming, Alessandro Dosio, Lorenzo Mentaschi, Erich M Fischer and Klaus Wyser, 2018
- “Human contribution to the European heatwave of 2003” (Stott et al., 2004)

• Dati e Metodi

- <https://www.ecmwf.int/en/research/climate-reanalysis>
- <https://www.ecmwf.int/en/about/media-centre/focus/2020/fact-sheet-reanalysis>
- <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>
- <https://confluence.ecmwf.int/pages/viewpage.action?pageId=74764925>
- https://www.iat.unina.it/pdf/tesi/abstract_Ciro_Nurcato.pdf
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., and Taylor, K. E.: Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization, *Geosci. Model Dev.*, 9, 1937-1958, 2016.
- CMIP6 and how observations can inform evaluation, Catherine Senior (MOHC) WGCM Co-Chair, Veronika Eyring (DLR, Germany) CMIP Panel Chair, 2014
- <https://www.cmcc.it/it/models/cmcc-esm-earth-system-model>
- “CMIP6 Simulations With the CMCC Earth System Model (CMCC-ESM2)” T. Lovato et. al. 2022
- <https://www.wdc-climate.de/ui/cmip6?input=CMIP6.CMIP.BCC.BCC-CSM2-MR>
- “BCC-CSM2-HR: a high-resolution version of the Beijing Climate Center Climate System Model” Tongwen Wu et al. ,2020
- <https://www.wdc-climate.de/ui/cmip6?input=CMIP6.CMIP.INM.INM-CM5-0.piControl>
- Simulation of the present-day climate with the climate model INMCM5, E. M. Volodin et.al, 2017
- <https://skepticalscience.com/rcp.php?t=1>
- <https://code.mpimet.mpg.de/projects/cdo/wiki/Tutorial>
- CDO User Guide (Uwe Schulzweida – MPI for Meteorology Climate Data Operator Version 2.0.0 October 2021)
- <https://interactive-atlas.ipcc.ch/regional-information>
- Climate indices with CDO (Climate indices of daily temperature and precipitation extremes October 2015 Uwe Schulzweida – MPI for Meteorology, Ralf Quast – Brockmann Consult)
- Compound Hot and Dry Events in Europe: Variability and Large-Scale Drivers (Monica Ionita, Diana E. Caldarescu and Viorica Nagavciuc), 2021

APPENDICE A

1) La selezione e la concatenazione dei vari file contenenti dati NetCDF è stata effettuata attraverso i comandi CDO: “-cat” e successivamente ”-seldate”. Si prende come esempio il singolo modello CMCC-ESM2, ma metodo analogo per tutti gli altri modelli:

```
cdo -cat tasmaxCMCC-ESM2_1975-1999.nc tasmaxCMCC-ESM2_2000-2014.nc tasmaxCMCC-ESM2_1975-2014.nc
```

```
e successivamente: cdo -seldate,1980-01-01,2014-12-31 tasmaxCMCC-ESM2_1975-2014.nc tasmax1980-2014CMCC-ESM2.nc
```

2) Il calcolo della media delle temperature massime giornaliere su tutto il periodo storico è stato effettuato attraverso il comando CDO “timmean”. Si prende come esempio il singolo modello CMCC-ESM2, ma metodo analogo per tutti gli altri modelli ed ERA5:

```
cdo -timmean tasmax1980-2014CMCC-ESM2.nc tasmax1980-2014CMCC-ESM2mean.nc]
```

3) La conversione della media delle temperature massime da Kelvin a Celsius è stata effettuata utilizzando il comando CDO “subc” attraverso cui viene sottratto il valore di 273.15 al valore delle temperature massime in Kelvin, si prende come esempio la reanalisi ERA5, ma ciò avviene anche per i singoli modelli:

```
cdo -b F64 subc,273.15 ERA5mean.nc ERA5mean_celsius.nc
```

4) Per interpolare i dati dei modelli ad una griglia comune, è stata dapprima creata la griglia di riferimento (griglia di ERA5), attraverso il comando CDO “griddes”:) Per interpolare i dati dei modelli ad una griglia comune, è stata dapprima creata la griglia di riferimento (griglia di ERA5), attraverso il comando CDO “griddes”:

```
cdo griddes ERA5mean.nc > ERA5grid.grd
```

e successivamente è stato utilizzato il comando CDO “remapbil” per interpolare i dati dei singoli modelli. Si prende come esempio il singolo modello CMCC-ESM2, ma metodo analogo anche per quanto riguarda gli altri modelli:

```
cdo remapbil,ERA5grid.grd, mean_tasmax1980-2014CMCC-ESM2.nc grid_mean_tasmax1980-2014CMCC-ESM2.nc
```

5) Il calcolo della media di ensemble è stato effettuato attraverso il comando CDO “ensavg”:

```
cdo -ensavg grid_mean_tasmax1980-2014CMCC-ESM2.nc grid_mean_tasmax1980-2014BCC-CSM2-MR.nc grid_mean_tasmax1980-2014INM-CM5.nc ensavgdjf1980-2014.nc
```

6) Il calcolo prima del percentile e poi dell'indice HWDI sul periodo storico (1980-2014) è stato effettuato per tutti i singoli modelli attraverso una serie di comandi CDO.

Il calcolo del 90° percentile è stato effettuato attraverso il comando “timpcptl”, considerando la media di tutti i valori minimi delle temperature massime giornaliere e la media di tutti i valori massimi delle temperature massime giornaliere (calcolate attraverso i comandi “timmin” e “timmax”). Si prende l'esempio del singolo modello CMCC-ESM2, ma metodo analogo anche per gli altri modelli:

```
cdo timpcptl,90 tasmax1980-2014CMCC-ESM2.nc -timmin tasmax1980-2014CMCC-ESM2.nc -timmax
tasmax1980-2014CMCC-ESM2.nc tasmax1980-2014CMCC-ESM2_pctl90.nc
```

Per la risoluzione di un problema legato al numero diverso di timestep per il successivo calcolo dell'indice HWDI, sono stati utilizzati ulteriori comandi CDO:

```
cdo -add tasmax1980-2014CMCC-ESM2_pctl90.nc -sub tasmax1980-2014CMCC-ESM2.nc tasmax1980-
2014CMCC-ESM2.nc tasmax1980-2014CMCC-ESM2_pctl90_with_timesteps.nc
```

Infine, è stato calcolato l'indice HWDI, attraverso il comando CDO “eca_hwdi”.

Si prende l'esempio del singolo modello CMCC-ESM2, ma uguale procedura per gli altri modelli:

```
cdo eca_hwdi,6,5 tasmax1980-2014CMCC-ESM2.nc tasmax1980-2014CMCC-ESM2_pctl90_with_timesteps.nc
hwdi_CMCC-ESM2_1980-2014.nc
```

7) In modo simile il calcolo del percentile e successivamente dell'indice HWDI, sul periodo storico (1980-2014) anche per ERA5:

```
cdo timpcptl,90 ERA5_1980-2014.nc -timmin ERA5_1980-2014.nc -timmax ERA5_1980-2014.nc ERA5_1980-
2014pctl90.nc
```

```
cdo -add ERA5_1980-2014pctl90.nc -sub ERA5_1980-2014.nc ERA5_1980-2014.nc ERA5_1980-
2014pctl90_with_timesteps.nc
```

```
cdo eca_hwdi,6,5 ERA5_1980-2014.nc ERA5_1980-2014pctl90_with_timesteps.nc hwdiERA5_1980-
2014_pctl.nc
```

8) L'interpolazione dei dati ad una griglia comune per ogni modello, relativamente all'indice HWDI, è stata effettuata, dapprima attraverso la creazione di una griglia comune (ERA5):

```
cdo griddes hwdiERA5_1980-2014_pctl.nc > hwdiERA5_historical.grd
```

Successivamente, attraverso il comando CDO “remapbil” è stata effettuata l'interpolazione.

Si prende come esempio il modello CMCC-ESM2, ma metodo analogo anche per gli altri modelli:

```
cdo remapbil,hwdiERA5_historical.grd, hwdi_CMCC-ESM2_1980-2014.nc hwdi_CMCC-ESM2_1980-
2014_grid.nc
```

9) Il calcolo della media di ensemble dei vari modelli, per quanto riguarda l'indice HWDI, è stato effettuato attraverso il comando CDO "ensavg": `cdo -ensavg hwdi_BCC-CSM2-MR_1980-2014_grid.nc hwdi_INM-CM5_1980-2014_grid.nc hwdi_ens_3mod.nc`

10) Il numero di giorni di ondata di calore l'anno è stato ottenuto attraverso il comando CDO "subc", utilizzato per dividere il numero di giorni di ondata di calore ottenuto su tutto il periodo storico per il numero di anni considerati:

```
cdo divc,35 hwdi_CMCC-ESM2_1980-2014_grid.nc hwdi_CMCC-ESM2_1980-2014_grid_peryear.nc
```

11) I dati delle temperature massime giornaliere relativi alle temperature massime giornaliere degli anni 2003 e 2012 sono stati selezionati utilizzando il comando CDO "seldate". Successivamente è stato calcolato il 90°percentile in riferimento all'intero periodo storico e poi l'indice HWDI (utilizzando come soglia il 90°percentile).

12) Per valutare le prestazioni dei modelli è stato calcolato il bias attraverso il comando CDO "sub", attraverso il quale è stata sottratta la media delle temperature massime di ERA5 dalla media delle temperature massime simulata dall'ensemble dei modelli:

```
cdo -b F64 -sub ensavg1980-2014_celsius.nc ERA5mean_celsius.nc biasensavg-ERA51980-2014.nc
```

13) Prima di ricavare il bias per confronto tra ogni modello e ERA5, si è effettuata dapprima la conversione da Kelvin a Celsius per ogni singolo modello. Si prende l'esempio del singolo modello CMCC-ESM2, ma metodo analogo anche per gli altri modelli:

```
cdo -b F64 subc,273.15 grid_mean_tasmax1980-2014CMCC-ESM2.nc grid_mean_tasmax1980-2014CMCC-ESM2_celsius.nc
```

Successivamente si ottiene in bias sottraendo la media delle temperature massime in Celsius per ERA5 dalla media delle temperature massime in Celsius per ogni singolo modello:

```
cdo -b F64 -sub grid_mean_tasmax1980-2014CMCC-ESM2_celsius.nc
```

```
ERA5mean_celsius.nc bias_tasmax_CMCC-ESM2-ERA5.nc
```

14) Per il periodo futuro sono stati concatenati e selezionati dati specifici attraverso i comandi CDO "cat" e "seldate". Si prende l'esempio del modello CMCC-ESM2, ma metodo analogo anche per gli altri modelli:

```
cdo cat tasmax_day_CMCC-ESM2_ssp585_r1i1p1f1_gn_20650101-20891231.nc tasmax_day_CMCC-ESM2_ssp585_r1i1p1f1_gn_20900101-21001231.nc tasmax_CMCC-ESM2_2065-2100
```

```
cdo seldate,2066-01-01,2100-12-31 tasmax_CMCC-ESM2_2065-2100 tasmax_CMCC-ESM2_2066_2100
```

15) Anche per le temperature massime giornaliere relativi al periodo futuro è stata calcolata la media e successivamente la conversione da Kelvin a Celsius, attraverso i comandi “timmean” e “subc” .

Si prende come esempio il modello CMCC-ESM2, ma metodo analogo anche per gli altri modelli:

```
cdo -timmean tasmax_CMCC-ESM2_2066_2100.nc tasmax_CMCC-ESM2_2066_2100mean.nc
cdo -b F64 subc,273.15 tasmax_CMCC-ESM2_2066_2100mean.nc tasmax_CMCC-
ESM2_2066_2100mean_celsius.nc
```

16) Interpolazione ad una griglia comune (ERA5), attraverso il comando CDO “remapbil” e calcolo della media di ensemble dei tre modelli per il periodo futuro 2066-2100, attraverso il comando “ensavg”:

```
cdo remapbil,ERA5grid.grd, tasmax1980-2014_BCC-CSM2-MRmean_celsius.nc tasmax1980-2014_BCC-
CSM2-MRmean_celsius_grid.nc
```

```
cdo remapbil,ERA5grid.grd, tasmax1980-2014_CMCC-ESM2mean_celsius.nc tasmax1980-2014_CMCC-
ESM2mean_celsius_grid.nc
```

```
cdo remapbil,ERA5grid.grd, tasmax1980-2014_INM-CM5-0mean_celsius.nc tasmax1980-2014_INM-CM5-
0mean_celsius_grid.nc
```

```
cdo -ensavg tasmax_BCC-CSM2-MR_2066-2100mean_celsius_grid.nc tasmax_CMCC-
ESM2_2066_2100mean_celsius_grid.nc tasmax_INM-CM5-0_2066-2100mean_celsius_grid.nc ensavg_2066-
2100_celsius.nc
```

17) Per il calcolo anomalia della media delle temperature massime del futuro rispetto al periodo storico considerato (differenza di temperatura massima tra futuro e passato) è stato utilizzato il comando CDO “sub”. Si prende come esempio il modello CMCC-ESM2, ma metodo analogo anche per gli altri modelli:

```
cdo -sub tasmax_CMCC-ESM2_2066_2100mean_celsius_grid.nc tasmax1980-2014_CMCC-
ESM2mean_celsius_grid.nc diff_CMCC-ESM2_fut-past.nc
```

18) Calcolo dell’indice HWDI per ogni modello per il periodo futuro (2066-2100) considerando come soglia il 90°percentile delle temperature massime giornaliere del periodo futuro (2066-2100), utilizzando i comandi CDO “timcctl”, “timmin” e “timmax” per il calcolo del 90°percentile.

Si prende come esempio per CMCC-ESM2, ma metodo analogo anche per gli altri modelli:

```
cdo timcctl,90 tasmax2066-2100CMCC-ESM2.nc -timmin tasmax2066-2100CMCC-ESM2.nc -timmax
tasmax2066-2100CMCC-ESM2.nc tasmax2066-2100CMCC-ESM2_pctl90.nc
```

Successivamente si è effettuato il calcolo dell’indice HWDI, prima risolvendo un problema relativo al differente numero di timestep tra il file del 90°percentile e delle tasmax.

```
cdo -add tasmax2066-2100CMCC-ESM2_pctl90.nc -sub tasmax2066-2100CMCC-ESM2.nc tasmax2066-
2100CMCC-ESM2.nc tasmax2066-2100CMCC-ESM2_pctl90_with_timesteps.nc
```

Infine, il calcolo effettivo dell'indice attraverso il comando CDO "eca_hwdi":

```
cdo eca_hwdi,6,5 tasmax2066-2100CMCC-ESM2.nc tasmax2066-2100CMCC-ESM2_pctl90_with_timesteps.nc  
hwdi_CMCC-ESM2_2066-2100.nc
```

Successiva divisione attraverso il comando CDO "divc" per ricavare il numero di giorni di ondata di calore l'anno: cdo divc,35 hwdi_CMCC-ESM2_2066-2100.nc hwdi_CMCC-ESM2_2066-2100_peryear.nc

19) Calcolo dell'indice HWDI, utilizzando come soglia il 90° percentile calcolato considerando le temperature massime giornaliere del periodo storico 1980-2014, attraverso il comando CDO "eca_hwdi". Si prende l'esempio del modello CMCC-ESM2, ma metodo analogo anche per gli altri modelli:

```
cdo eca_hwdi,6,5 tasmax2066-2100CMCC-ESM2.nc tasmax1980-2014CMCC-ESM2_pctl90_with_timesteps.nc  
hwdi_CMCC-ESM2_2066-2100_reference1980-2014.nc
```

Successiva divisione attraverso il comando CDO "divc" per ricavare il numero di giorni di ondata di calore l'anno: cdo divc,35 hwdi_CMCC-ESM2_2066-2100_reference1980-2014.nc hwdi_CMCC-ESM2_2066-2100_reference1980-2014_peryear.nc

20) Calcolo della media di ensemble, attraverso il comando CDO "ensavg" per quel che riguarda l'indice HWDI calcolato per ogni modello, previa interpolazione attraverso il comando CDO "remapbil" alla griglia comune di ERA5:

```
cdo remapbil,hwdiERA5_historical.grd, hwdi_BCC-CSM2-MR_2066-2100.nc hwdi_BCC-CSM2-MR_2066-  
2100_grid.nc
```

```
cdo remapbil,hwdiERA5_historical.grd, hwdi_CMCC-ESM2_2066-2100.nc hwdi_CMCC-ESM2_2066-  
2100_grid.nc
```

```
cdo remapbil,hwdiERA5_historical.grd, hwdi_INM-CM5_2066-2100.nc hwdi_INM-CM5_2066-2100_grid.nc
```

```
cdo -ensavg hwdi_BCC-CSM2-MR_2066-2100_grid.nc hwdi_CMCC-ESM2_2066-2100_grid.nc hwdi_INM-  
CM5_2066-2100_grid.nc hwdi_ens_2066-2100.nc
```

21) Calcolo dell'anomalia relativa all'indice HWDI per il periodo futuro (2066-2100), calcolato utilizzando le differenti soglie (90° percentile 1980-2014, 90° percentile 2066-2100), come differenza tra l'indice HWDI calcolato per il periodo futuro e l'indice HWDI calcolato per il periodo storico.

Si prende come esempio il modello CMCC-ESM2, ma metodo analogo per gli altri modelli singoli e l'ensemble dei modelli utilizzati. Inoltre si considera nell'esempio l'indice HWDI calcolato utilizzando come soglia il 90° percentile calcolato considerando le temperature massime giornaliere 1980-2014, ma metodo analogo anche se si considera l'altra soglia. Esempio singolo modello; cdo -sub hwdi_CMCC-ESM2_2066-2100_reference1980-2014_peryear_grid.nc hwdi_CMCC-ESM2_1980-2014_grid_peryear.nc hwdi_diff_fut-pas_CMCC-ESM2.nc
.Esempio ensemble dei modelli: cdo -sub hwdi_ens_2066-2100_peryear.nc hwdi_ens_3mod_1980-2014_peryear.nc hwdi_ens_diff_fut-pas.nc

APPENDICE B

Esempio di codice Python per la realizzazione di una mappa utilizzata per lo studio presentato in questa tesi (a seguire la corrispondente mappa):

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import xarray as xr
import cartopy
import cartopy.crs as ccrs
#%%
ds = xr.open_dataset('/Users/mac/desktop/tasmaxmod/bias/bias_tasmax/bias_tasmax_CMCC-ESM2-ERA5.nc')

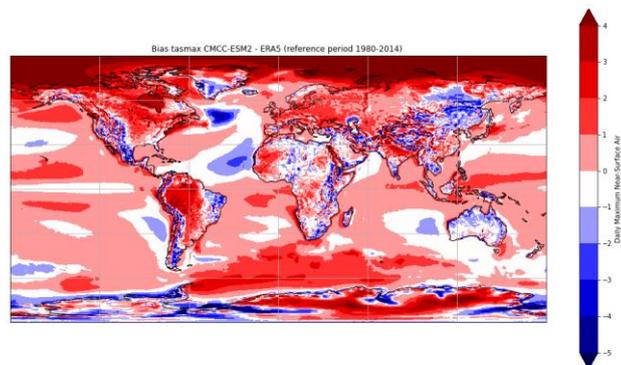
t=ds.tasmax
#t=ds.heat_wave_duration_index_wrt_mean_of_reference_period

plt.rcParams['figure.figsize'] = (18, 10)

levels = np.linspace(-5,5, num=500, dtype=int, axis = 0)
ax = plt.axes(projection=ccrs.PlateCarree())
#ax = plt.axes(projection="robin")

t.plot(ax=ax, transform=ccrs.PlateCarree(), cmap='seismic',levels=levels)
#t.plot(ax=ax, transform=ccrs.PlateCarree(), cmap='afmhot_r',levels=levels)
#t.plot(ax=ax, transform=ccrs.PlateCarree(), cmap='hot_r',levels=levels)

ax.coastlines(); ax.gridlines();
plt.title('Bias tasmax CMCC-ESM2 - ERA5 (reference period 1980-2014)')
```



RINGRAZIAMENTI

Un grande ringraziamento al CMCC, per avermi dato la possibilità di vivere un'esperienza formativa di grande rilievo e avermi dato modo di assaporare il mondo della ricerca scientifica nell'ambito climatico.

In modo particolare ringrazio Enrico Scoccimarro, per la disponibilità, il supporto e la tanta pazienza, figura di vitale importanza per il lavoro svolto.

Ringrazio la professoressa Nadia Pinardi, per gli utili consigli, la sua disponibilità nel supportare il mio lavoro e per avermi dato la possibilità di conoscere le attività del CMCC.

Ringrazio tutte le persone che mi sono state vicine in questi mesi, sia nei momenti di demoralizzazione, che in quelli emozionanti, frutto delle esperienze vissute.

Sicuramente un ringraziamento speciale alla mia famiglia per il supporto, incoraggiamento e aiuto nei momenti in cui avevo più bisogno di loro, in primis i miei genitori Cristina e Tonino e mio fratello Damiano, sempre al mio fianco, ma anche Elisa e Sannie, il cui confronto e aiuto è stato molto importante.

Un ringraziamento anche ad amici e conoscenti, di Ravenna e di Bologna, che hanno vissuto con me la realizzazione del mio lavoro, tante belle persone, che in un modo o in un altro, in vari momenti e fasi in questi mesi di lavoro hanno sempre trovato le giuste parole e il tempo di aiutarmi e starmi vicino nel miglior modo possibile.

Anche per me si conclude un percorso importante della mia vita, sono stati anni belli ed emozionanti, in cui sono cresciuto a livello accademico, ma non solo, e per questo ringrazio tutti coloro, soprattutto i miei colleghi con cui ho condiviso molto, che in questi anni, esame dopo esame, sfida dopo sfida, ci sono stati.