

Evidenze dei cambiamenti climatici nella variabilità della temperatura in Italia

INTRODUZIONE

La fase di intenso riscaldamento globale che stiamo vivendo negli ultimi decenni è iniziata in maniera inequivocabile a partire dagli anni '50 e ha subito un'accelerazione dalla fine degli anni '80 come è stata evidenziata da molti studi scientifici. Tale aumento ha interessato sia i valori climatici medi di temperatura mensile e stagionale, sia gli eventi estremi (IPCC, 2014). Il cambiamento climatico è significativamente attribuibile anche agli effetti delle emissioni delle attività antropiche e mostra numerose eterogeneità a livello planetario; l'area del Mediterraneo si distingue per essere una delle zone più critiche per quanto riguarda le ondate di calore (Baldi et al., 2006; Efthymedis et al., 2011).

Il riscaldamento globale provoca, poi, effetti che sono misurabili anche attraverso degli indicatori fisici quali, ad esempio, l'innalzamento del livello del mare, l'incremento del contenuto di calore degli oceani, la diminuzione delle superfici ricoperte da neve e da ghiaccio (marine e terrestri), l'aumento della frequenza di giorni molto caldi e degli episodi di piogge molto intense (IPCC, 2014). A tal riguardo una collezione di 27 indicatori meteo-climatici è stata costituita al fine di individuare l'occorrenza degli eventi estremi (Expert Team on Climate Change Detection and Indices-ETCCDI) in maniera il più possibile omogenea sia per scopi di monitoraggio che di proiezione climatica futura (Sillmann et al., 2013 a-b).

Le proiezioni per il XXI secolo dei 27 indicatori ETCCDI, effettuate sulla base di diversi modelli climatici e di diversi scenari di emissione di

* *Istituto di Biometeorologia – Dipartimento di Scienze Bio-Agroalimentari; Consiglio Nazionale delle Ricerche*

anidride carbonica indicano, tra gli altri, un incremento della frequenza di giorni estremamente caldi, sempre più presenti in sequenze molto lunghe (Sillmann et al., 2013-b). Questo aspetto è intrinsecamente collegato ai fattori di “sofferenza da caldo”, cui sono sottoposti gli esseri viventi in genere (McMichael et al., 2006).

L'obiettivo del presente studio è di costruire un quadro sintetico del cambiamento climatico in atto in Italia per quanto riguarda le ondate di calore, basato su dati osservati spazializzati, oltre che evidenziare il ruolo importante svolto da un meccanismo atmosferico specifico, il West African Heat Low, nel processo di genesi e mantenimento delle ondate di calore stesse.

Negli ultimi anni un crescente interesse scientifico è stato focalizzato sulla valutazione degli impatti dei cambiamenti climatici relativamente alle produzioni zootecniche e in particolare degli effetti dovuti alle ondate di calore. Recenti studi, infatti, hanno dimostrato che la sofferenza delle vacche da latte indotta dalle ondate di caldo comporta un incremento dei tassi di mortalità (Vitali et al., 2009) e un decadimento della qualità e quantità del latte prodotto (Bertocchi et al., 2014). Inevitabilmente, quindi, modifiche della variabilità climatica determinano un impatto economico significativo sui redditi degli imprenditori agricoli (Dono et al., 2014).

Per mettere meglio in evidenza le relazioni tra fenomeni atmosferici a grande scala e le ondate di calore sul nostro territorio sono stati presi in considerazione tre aspetti complementari per l'identificazione e l'analisi delle ondate di calore e dei possibili mutamenti nel quadro dei cambiamenti climatici in atto: 1) la scomposizione della variabilità climatica della temperatura; 2) l'analisi storica degli eventi e 3) lo studio di possibili meccanismi atmosferici generatori, le cosiddette forzanti climatiche di larga scala. L'analisi di seguito riportata è incentrata sul territorio italiano per i mesi di maggior rischio d'impatto delle ondate di calore: da Maggio a Settembre.

MATERIALI E METODI

Il primo punto dell'analisi proposta è la scomposizione della variabilità climatica durante l'ultimo secolo in tre componenti caratterizzate da differenti scale temporali: il trend di lungo periodo, la variabilità decennale e la variabilità inter-annuale. La base di dati utilizzata è composta dalla serie mensile dei valori di temperatura media mensile dal 1901 al 2009, sull'areale che interessa il territorio italiano a partire dal dataset UEA CRU TS3p1 (Harris et al., 2014). La metodologia applicata per la decomposizione delle serie temporali di tem-

peratura media mensile è invece descritta nel dettaglio in Green et al., 2011.

L'analisi delle scale temporali della temperatura media del periodo Maggio-Settembre permette di evidenziare i principali modi di variabilità sulla regione del Mediterraneo Centrale. Il trend di lungo periodo è stato calcolato (Green et al., 2011) tramite una regressione del segnale locale della temperatura rispetto alla serie temporale della temperatura media globale ottenuta dalla media dei modelli di circolazione globale provenienti dall'esperimento di "Twentieth Century Climate in Coupled Models" (20C3M) utilizzati nel AR4 dell'IPCC. Il trend temporale che ne risulta è quindi riconducibile al cambiamento climatico e rappresenta la parte del segnale locale di cambiamento della temperatura che è linearmente dipendente dalla temperatura media globale.

Le altre analisi proposte in questo studio sono riferite invece ai dati giornalieri di temperatura massima e minima e ai dati riguardanti l'indice WAHL. I primi sono stati estratti dal *data set* EOBS (Version 11.0) relativamente all'area individuata dalle coordinate geografiche dei quattro punti (6°, 19° Lon Est e (36°, 48°) Lat Nord che circoscrive il territorio italiano. Tali dati sono costituiti dai valori stimati nelle 2496 celle del grigliato regolare con risoluzione di cella pari a (0.25° X 0.25°) sulla base delle osservazioni registrate dalle stazioni a terra (Haylock et al., 2008).

I secondi, invece, rappresentano i valori dell'indice WAHL in termini assoluti sempre per il periodo Maggio-Settembre 1951-2013, che sono stati ottenuti seguendo la definizione proposta in Chauvin et al., 2010 a partire dai dati giornalieri delle Reanalisi NCAR/NCEP (Kalnay et al., 1996). Tale definizione esprime l'intensità del WAHL sulla base della differenza, espressa in metri, tra l'altezza geopotenziale relativa alle quote 850hPa e 925hPa sul dominio dell'Africa Nord Occidentale, e isolando poi il valore del 90^{mo} percentile tra tutti i valori del dominio di ogni particolare giorno. La variabilità del WAHL è sostanzialmente determinata sia dalla variabilità dei processi monsonici dell'Africa occidentale, sia dalla variabilità Atlantica. Il WAHL rappresenta quindi un meccanismo di risposta a processi di larga scala, sia tropicali che delle medie latitudini, la cui azione ha un netto impatto nell'avvezione di masse d'aria calda sul nostro territorio nazionale.

Tale meccanismo atmosferico produce, infatti, un flusso divergente in quota generato e mantenuto dal riscaldamento dei bassi strati della troposfera sul deserto del Sahara e, più in particolare, nell'area dell'Africa Nord Occidentale. Infatti, l'espansione termica conseguente al riscaldamento della superficie sahariana determina un innalzamento dell'aria con conseguente formazione di un flusso convergente nei bassi strati della troposfera e un corrispondente flusso divergente negli alti strati. Tale divergenza,

presente a una quota di circa 1400m – 1600m sul livello del mare è tra i responsabili del trasporto, per avvezione, di masse d'aria di origine sub tropicale calde e spesso ricche di aerosol verso il Mediterraneo (Gaetani et al., 2012). L'indice proposto da Chauvin et al., 2010 sintetizza in modo preciso questa dinamica ed è in grado di rappresentare le fasi di vigore del WAHL responsabili di un più efficiente trasporto di aria calda di origine nord africana nel Mediterraneo Centrale e sull'Italia in particolare e, quindi, di propensione alla genesi e al mantenimento di una ondata di calore sul nostro territorio.

Per quanto riguarda l'analisi storica delle ondate di caldo, si considerano le variabili: “numero di ondate di caldo”, “durata media delle ondate di caldo” e “numero di giorni inclusi in un'ondata di caldo” cumulato nei mesi da Maggio a Settembre, relativamente al periodo 1951-2013.

Sulla base delle indicazioni fornite dal gruppo di lavoro ETCCDI, definiamo “ondata di caldo”, il fenomeno per il quale si registra una sequenza di almeno 6 giorni con temperatura giornaliera massima (TX) o temperatura giornaliera minima (TN) superiore al valore di soglia giornaliero corrispondente al 90.^{mo} percentile (Karl et al., 1999). Più specificatamente, si calcola una serie di valori giornalieri per il periodo di analisi, in modo tale da avere uno specifico valore soglia per ciascun giorno di osservazione e, successivamente, si verifica giorno per giorno l'eventuale superamento della soglia. Il valore di soglia giornaliero si calcola prendendo i valori osservati per quel giorno giuliano e per i due giorni precedenti e successivi, relativi al trentennio 1961-1990, in modo tale da avere una serie di 150 termini, che costituisce la base su cui individuare il valore corrispondente al 90.^{mo} percentile. In questo studio adottiamo lo schema descritto in precedenza con l'eccezione del periodo trentennale di riferimento, dal momento che consideriamo il periodo 1971-2000. Tale scelta è stata fatta sulla base delle indicazioni generali del NOAA, che propone l'aggiornamento ogni 10 anni della base di riferimento al fine di renderla più “simile” al clima attuale e di altri studi che indicano, per l'Italia, una chiara differenza nei livelli medi dei due periodi (Beltrano et al., 2007). Il gruppo ETCCDI definisce, inoltre, l'indicatore *Warm spell duration index-WSDI* come il conteggio dei giorni che rientrano in un'ondata di caldo, così come definita in precedenza nei mesi maggiormente a rischio per la salute sia umana che animale: da Maggio a Settembre. Dunque, utilizziamo i dati di temperatura massima giornaliera (TX) e minima giornaliera (TN) aggregati per il periodo Maggio-Settembre 1971-2000 per il computo della soglia giornaliera TX90 e TN90 e i dati relativi al periodo Maggio-Settembre

1951-2013 per l'analisi del numero delle ondate di caldo, della loro durata media e dell'indice WSDI.

Infine, l'ultimo aspetto di questo studio riguarda un'analisi della correlazione tra l'indice WAHL e le ondate di caldo registrate nei mesi da Maggio a Settembre nel corso del periodo 1951-2013 e mira a dimostrare che esiste una relazione funzionale tra il meccanismo del WAHL e un'ondata di caldo nel bacino del Mediterraneo Centro-Occidentale. A tal fine, consideriamo la distribuzione di probabilità dei valori giornalieri dell'indice WAHL condizionata rispetto ai giorni inclusi in un'ondata di caldo e la confrontiamo con la corrispettiva distribuzione non condizionata. In altre parole vogliamo verificare se la presenza dell'ondata di caldo provoca un cambiamento nella forma distributiva dei dati dell'indice WAHL. Questa verifica è effettuata utilizzando il *test* non parametrico di Wilcoxon-Mann-Whitney (Wilcoxon, 1945; Mann e Whitney, 1945) e il *test* parametrico T Student (Gosset, 1908), al fine di valutare se i valori dell'indice WAHL condizionati hanno una media sistematicamente superiore rispetto agli stessi non condizionati.

Una condizione necessaria per l'applicazione di questi *tests* è che i dati campionari utilizzati siano estratti in maniera indipendente l'uno dall'altro e, nel caso di confronto tra due campioni, che i due campioni siano tra loro indipendenti. Nel nostro caso è necessario tener conto del fatto che giorni caldi consecutivi sono dovuti alla presenza di condizioni atmosferiche specifiche (un sistema a grande scala che permane per più giorni). Dunque, i due campioni (valori del WAHL e valori del WAHL condizionati rispetto alle ondate di calore) non possono considerarsi statisticamente indipendenti. Tuttavia, se si considerano le due popolazioni: i) valore dell'indice WAHL nei giorni fuori dalle ondate di caldo e ii) valori dell'indice WAHL nei giorni inclusi nelle ondate di caldo, allora i due campioni possono considerarsi indipendenti e si possono applicare i *tests* per campioni indipendenti, vale a dire il *test* U di Wilcoxon-Mann-Whitney per campioni indipendenti e il *test* t Student per campioni indipendenti, quest'ultimo previo rispetto della condizione che i dati seguano una distribuzione gaussiana. Per maggior chiarezza, definiamo e denominiamo i confronti effettuati nel modo che segue:

1. T1, *test* che confronta i valori del WAHL durante i giorni caldi con $TX > TX_{90}$ o $TN > TN_{90}$ anche non appartenenti a ondate rispetto ai valori del WAHL per i restanti giorni;
2. T2, *test* che confronta i valori del WAHL durante i soli giorni caldi inclusi in un'ondata rispetto ai valori del WAHL per i restanti gior-

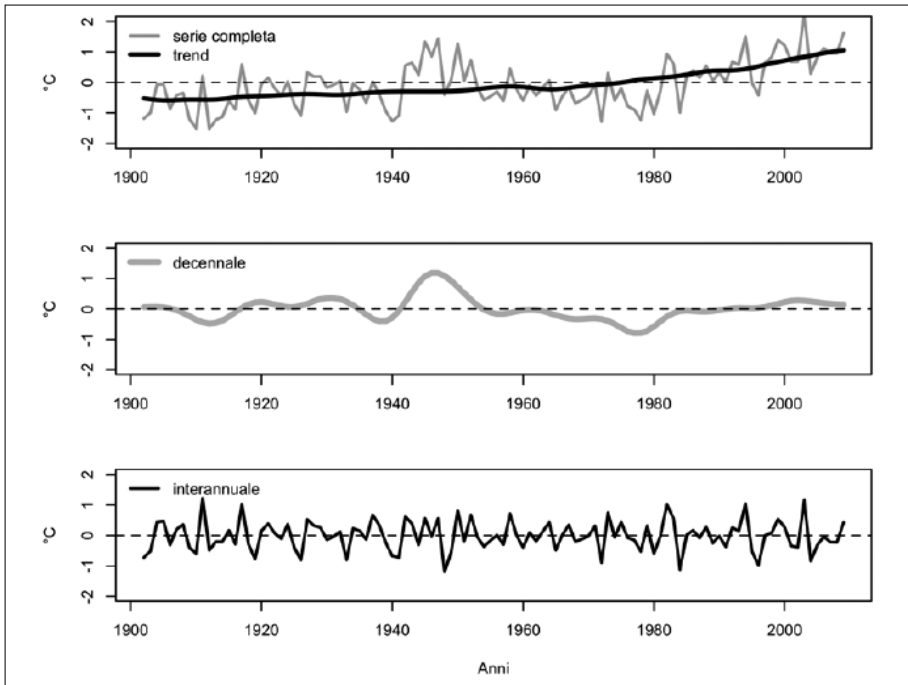


Fig. 1 *Scomposizione della variabilità temporale del valore medio di temperatura da maggio a settembre sul Mediterraneo Centrale (5°E-20°E; 35°N-48°N)*

ni, vale a dire i giorni con $TX(TN) < TX(TN)_{90}$ in aggiunta a quelli con $TX(TN) > TX(TN)_{90}$ non inclusi in un'ondata;

3. T3, *test* che confronta i valori del WAHL per ogni singolo giorno tra i 15 precedenti l'inizio di un'ondata di caldo rispetto ai valori del WAHL per i restanti giorni.

Il *test* T3 è utile per valutare la dinamica completa della relazione oggetto di studio anche nell'ottica di definizione di un modello strutturale di previsione.

RISULTATI

Analisi della variabilità della temperatura media stagionale

Nella figura 1 sono riportati i dati di temperatura media del periodo Maggio-Settembre insieme all'analisi della variabilità temporale calcolata sul dominio geografico del Mediterraneo Centrale per il periodo 1901-2009. Il *trend* di lun-

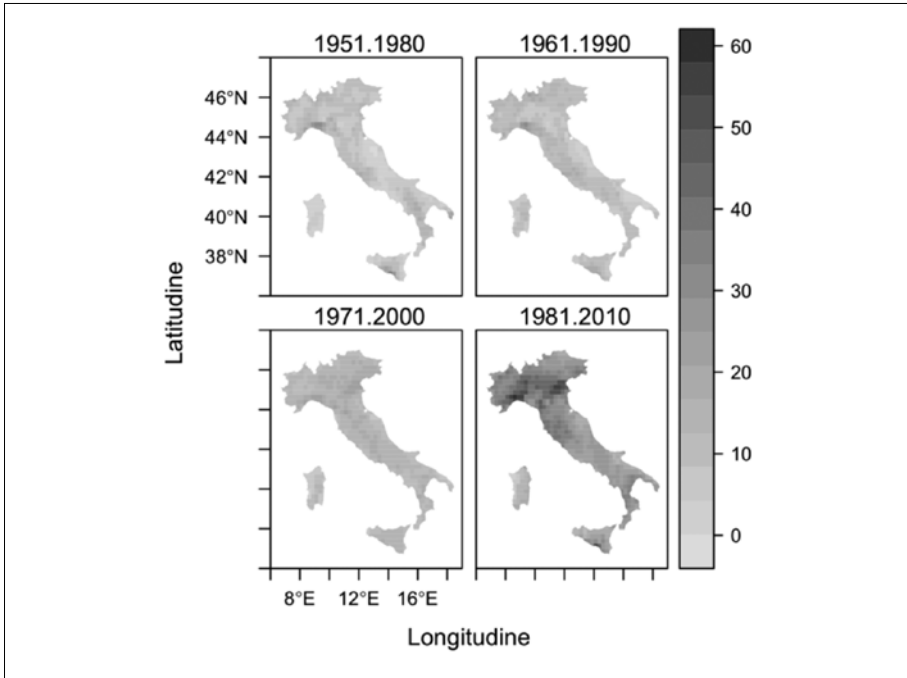


Fig. 2 *Mappa del Numero delle Ondate di Caldo della Temperatura Massima giornaliera in Italia durante il periodo Maggio-Settembre: confronto tra i trentenni 1951-1980, 1961-1990, 1971-2000 e 1981-2010*

go periodo, che descrive il 33% circa della variabilità totale del segnale analizzato, risulta complessivamente positivo e caratterizzato da un'accelerazione a partire dagli anni '80. La variabilità decennale, che descrive da sola il 25% circa della variabilità totale mostra invece la successione di periodi più caldi e periodi più freddi, con decenni caratterizzati da anomalie anche significativamente intense come, ad esempio, il periodo caldo successivo al 1940. La variabilità rimanente, che descrive il 41% circa del segnale analizzato rappresenta, infine, la cosiddetta variabilità inter-annuale dovuta essenzialmente alle interazioni tra meccanismi climatici sia di larga che di piccola scala.

Analisi delle ondate di caldo tramite l'indice WSDI

Per quanto riguarda la Temperatura Massima, il quadro climatico del periodo Maggio-Settembre che emerge dall'analisi si contraddistingue per un significativo aumento del numero di ondate di caldo nel trentennio 1981-2010 ri-

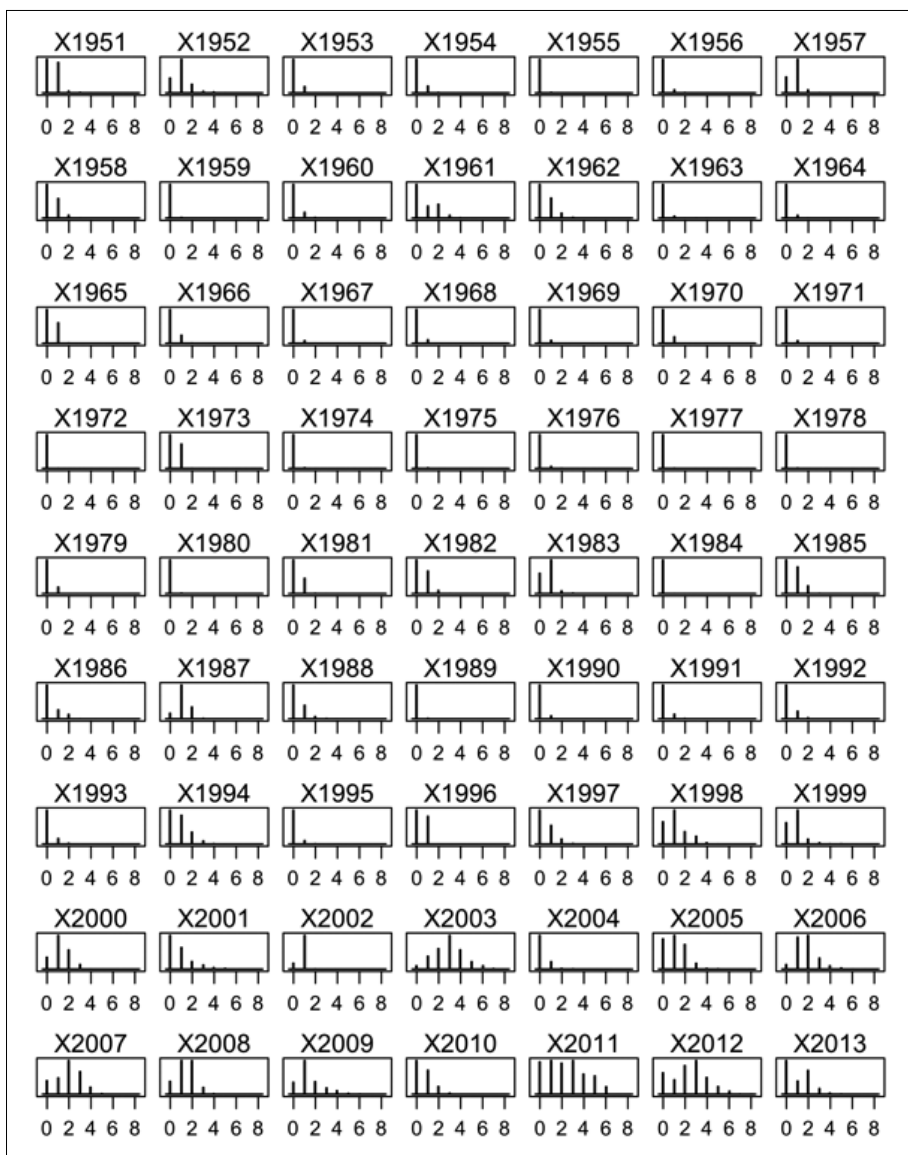


Fig. 3 *Ondate di Caldo della Temperatura Massima giornaliera in Italia durante il periodo Maggio-Settembre 1951-2013: distribuzione di frequenza del numero di ondate registrate sulle 2496 celle del dominio spaziale anno per anno*

petto agli altri trentenni, con particolare interessamento delle zone del Nord-Ovest (Basso Piemonte, Liguria e Pianura Padana) e Centro (Toscana), dove si sono registrate fino a 60 ondate di calore (fig. 2).

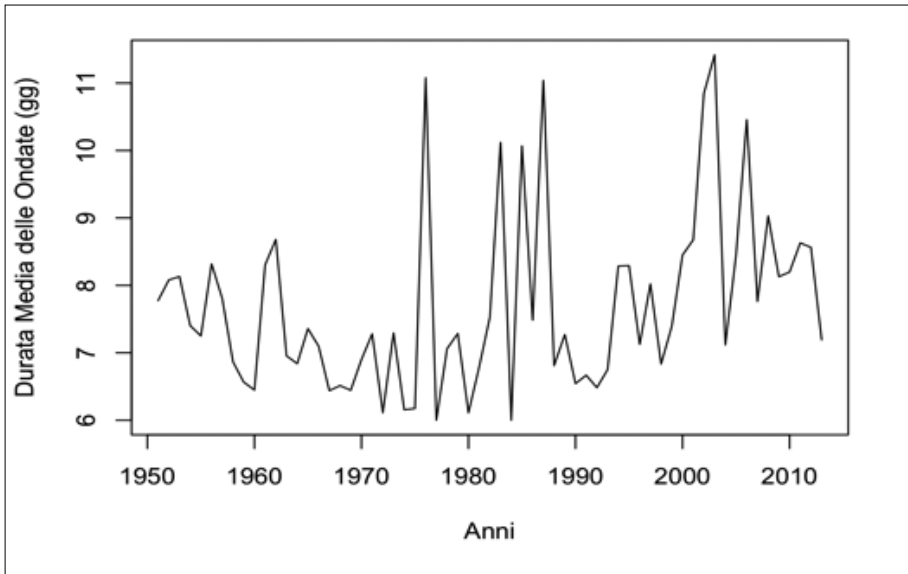


Fig. 4 Serie storica della Durata Media delle Ondate di Caldo della Temperatura Massima giornaliera in Italia durante il periodo Maggio-Settembre 1951-2013: media areale sull'intero dominio considerato

Inoltre, come si vede nella figura 3, la distribuzione di frequenza del numero di ondate aggregate anno per anno sulle 2496 celle del dominio spaziale di analisi evidenzia un netto cambiamento del regime a partire dal 2003, quando si ha uno spostamento a destra del valore centrale della distribuzione (incremento del numero di ondate di calore) e una maggiore variabilità del fenomeno. Si noti, inoltre, come segnali di cambiamento nel senso appena descritto si erano manifestati, seppur con delle discontinuità, già a partire dal 1994. L'analisi della serie storica della durata media delle ondate di caldo supporta questa ipotesi di un cambio di regime nei primi anni '90, quando si evidenzia un *trend* crescente interrotto proprio nell'ultimo anno di analisi (fig. 4). Precedentemente si registrano due ulteriori fasi contraddistinte, la prima da un trend decrescente che va dal 1951 a metà degli anni '70 e la seconda da una fase stazionaria che giunge fino ai primi anni '90 con picchi di durata molto elevati e simili a quelli raggiunti nel 2003 (10-11 giorni). Questa fase, come si può verificare dalla figura 3, registra, tuttavia, pochi casi di ondate di caldo e anche il numero di giorni caldi complessivamente registrati è sensibilmente inferiore a quello registrato durante la terza fase. Infatti, visualizzando il boxplot della figura 5, si nota ancor più chiaramente il cambio di regime emerso a partire da metà degli anni '90.

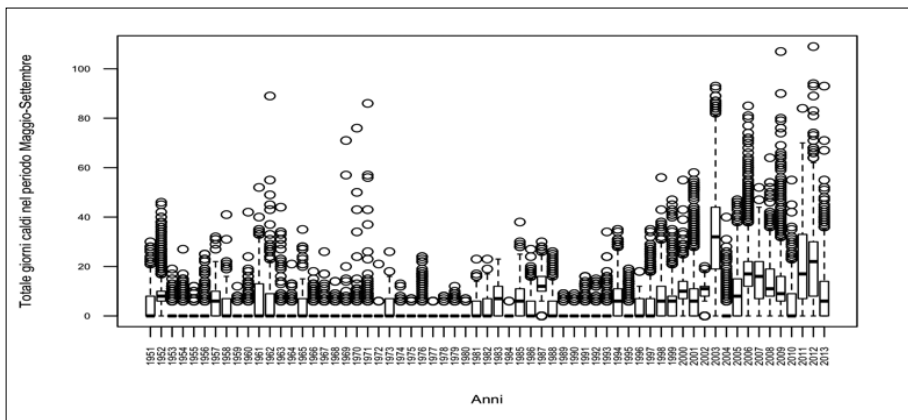


Fig. 5 Boxplot della distribuzione spaziale (tutte le celle dell'area) del Numero di Giorni Caldi contati complessivamente durante le Ondate di Caldo della Temperatura Massima giornaliera per il periodo Maggio-Settembre 1951-2013 in Italia

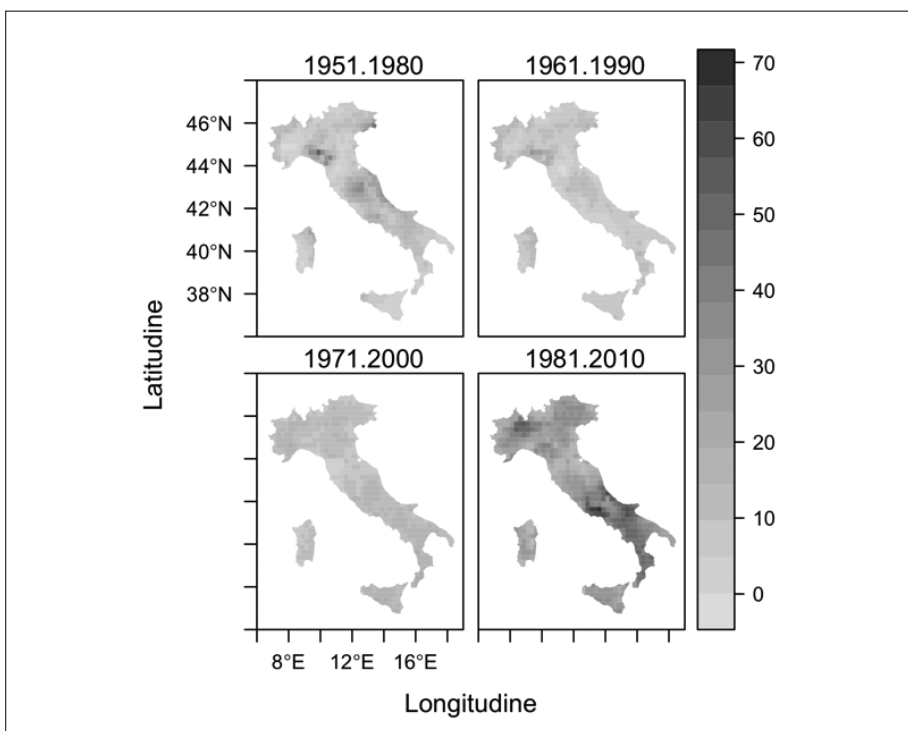


Fig. 6 Numero Cumulato delle Ondate di Caldo della Temperatura Minima giornaliera in Italia durante il periodo Maggio-Settembre: confronto tra i trentenni 1951-1980, 1961-1990, 1971-2000 e 1981-2010

Per quanto riguarda la Temperatura Minima, si possono fare delle considerazioni molto simili a quelle fatte per la Temperatura Massima, in special modo quelle relative all'individuazione di tre fasi distinte nell'arco del periodo analizzato e al sensibile incremento delle ondate di caldo nella terza fase, tuttavia è utile descrivere alcune differenze. Innanzi tutto, le zone che hanno registrato un incremento nel numero di ondate nel trentennio 1981-2010 sono non solo quelle del Nord come succede per la Temperatura Massima, ma anche e soprattutto quelle del Sud, a esclusione della Sicilia (fig. 6). Ancora osservando la figura 6, si nota come il numero massimo di ondate registrate è ben superiore di 10 unità a quelle relative alla Temperatura Massima: questo a conferma del fatto che l'incremento delle ondate di caldo nell'ultimo trentennio è ascrivibile con maggior importanza alla Temperatura Minima.

D'altro canto, come si vede dalla figura 8, la durata media delle ondate di caldo è comparabile tra le due variabili, a eccezione dell'anno 2003 il cui valore è superiore di circa 1,5 giorni a quello della Temperatura Massima.

Il totale di giorni caldi inclusi nelle ondate raggiunge, per alcune zone meridionali, fino a 120 giorni negli anni relativi alla terza fase, vale a dire quella che abbiamo individuato a partire dalla metà degli anni '90, particolarmente negli anni 2007, 2008 e 2011 (fig. 9). Questo livello è superiore a quelli registrati per la Temperatura Massima di circa 20 unità. Inoltre, il numero di giorni caldi che si osservano nella prima fase, che va dal 1951 a metà degli anni '70 è particolarmente elevato a dispetto di una durata media non corrispondentemente elevata (fig. 8), quando si sono verificate molte ondate di durata uguale, o appena superiore, alla soglia minima dei 6 giorni.

Correlazione con i meccanismi di larga scala: distribuzione condizionata dell'indice WAHL rispetto ai giorni di caldo

In termini generali e sintetici, la risposta dei *tests* statistici alla domanda riguardo l'esistenza di una relazione funzionale tra il meccanismo del WAHL e l'occorrenza di un' ondata di caldo nel bacino del Mediterraneo Centrale e, più specificatamente, nella penisola italiana è affermativa. In altre parole, possiamo rifiutare un'ipotesi che suppone l'indipendenza dei due fenomeni e sostenere invece un'ipotesi alternativa secondo la quale la distribuzione dei valori del WAHL, quando è in atto un' ondata di caldo, ha un valore centrale mediamente superiore alla stessa distribuzione quando siamo in condizioni normali (fuori da un' ondata). Tale affermazione risulta statisticamente significativa al 5%. Una sintesi dei valori

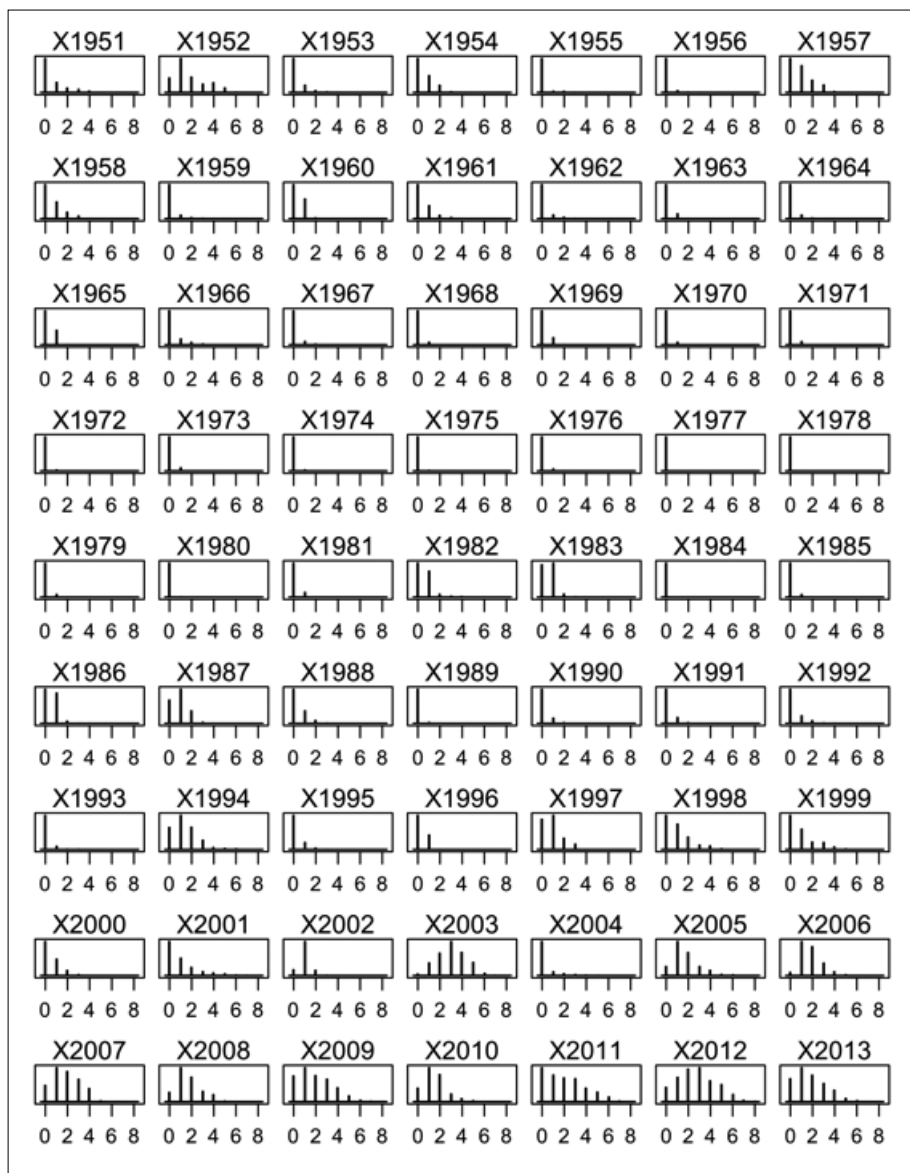


Fig. 7 *Ondate di Caldo della Temperatura Minima giornaliera in Italia durante il periodo Maggio-Settembre 1951-2013: distribuzione di frequenza del numero di ondate registrate sulle 2496 celle del dominio spaziale anno per anno*

dell'indice WAHL riscontrati in tutte le celle dell'area di studio, nel campionamento relativo al caso T1 (Giorni caldi anche fuori da un'ondata *vs*

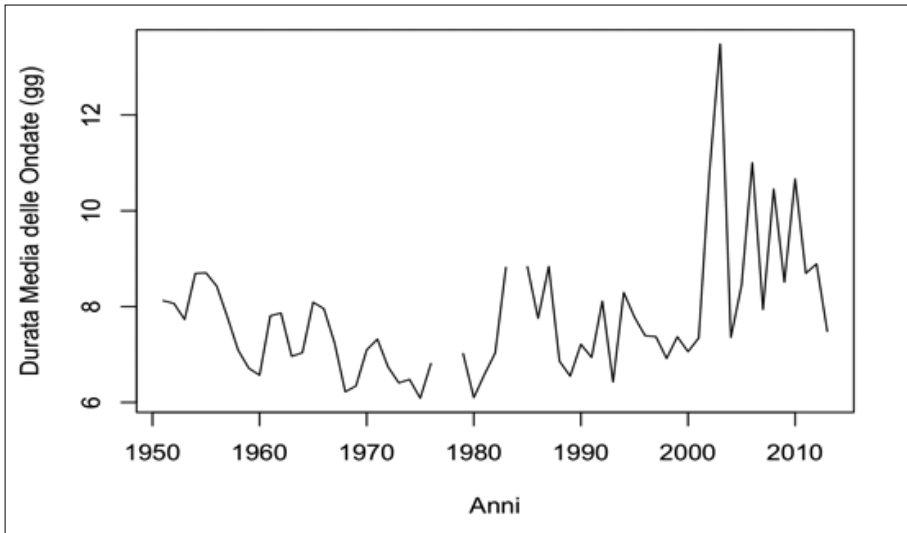


Fig. 8 *Serie storica della Durata Media delle Ondate di Caldo della Temperatura Minima giornaliera in Italia durante il periodo Maggio-Settembre 1951-2013: media areale*

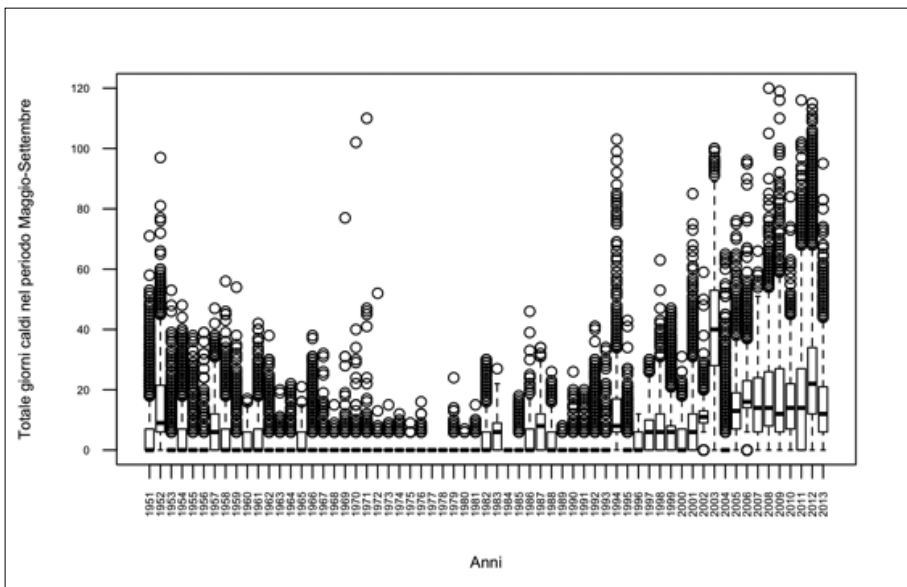


Fig. 9 *Boxplot della distribuzione spaziale (tutte le celle dell'area) del Numero di Giorni Caldi contati complessivamente durante le Ondate di Caldo della Temperatura Minima giornaliera per il periodo Maggio-Settembre 1951-2013 in Italia*

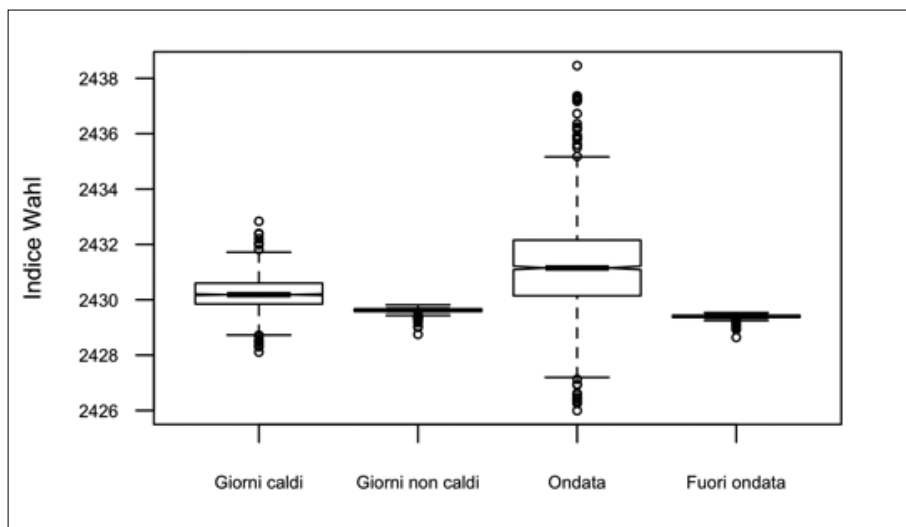


Fig. 10 *Distribuzione dei valori dell'indice WAHL riscontrati in tutte le celle dell'area di studio nel campionamento relativo al caso T1 e T2: Temperatura Massima*

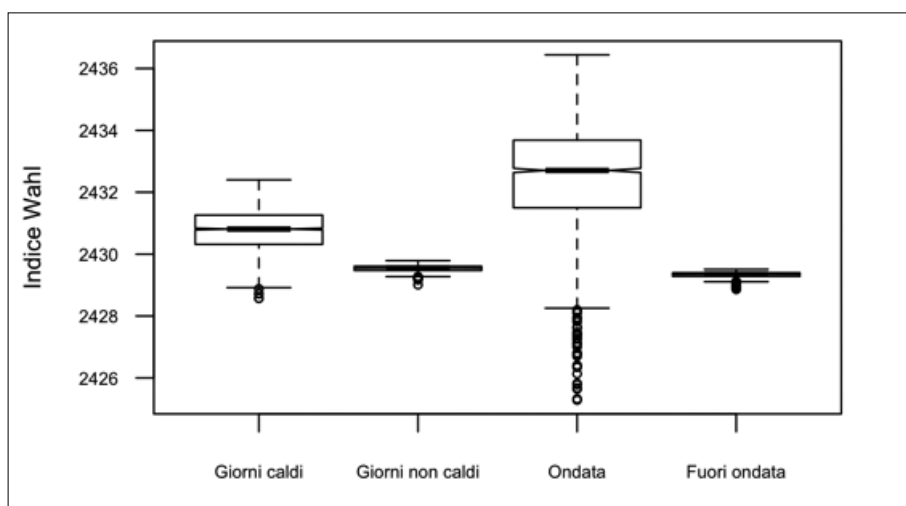


Fig. 11 *Distribuzione dei valori dell'indice WAHL riscontrati in tutte le celle dell'area di studio nel campionamento relativo al caso T1 e T2: Temperatura Minima*

Giorni non caldi) e T2 (Giorni caldi inclusi in un'ondata *vs* Giorni fuori da un'ondata) è riportata nei *boxplots* delle figure 10 e 11, rispettivamente per la TX e per la TN.

Come si vede dalle mappe delle figure 12 e 13, ove sono riportati i valori

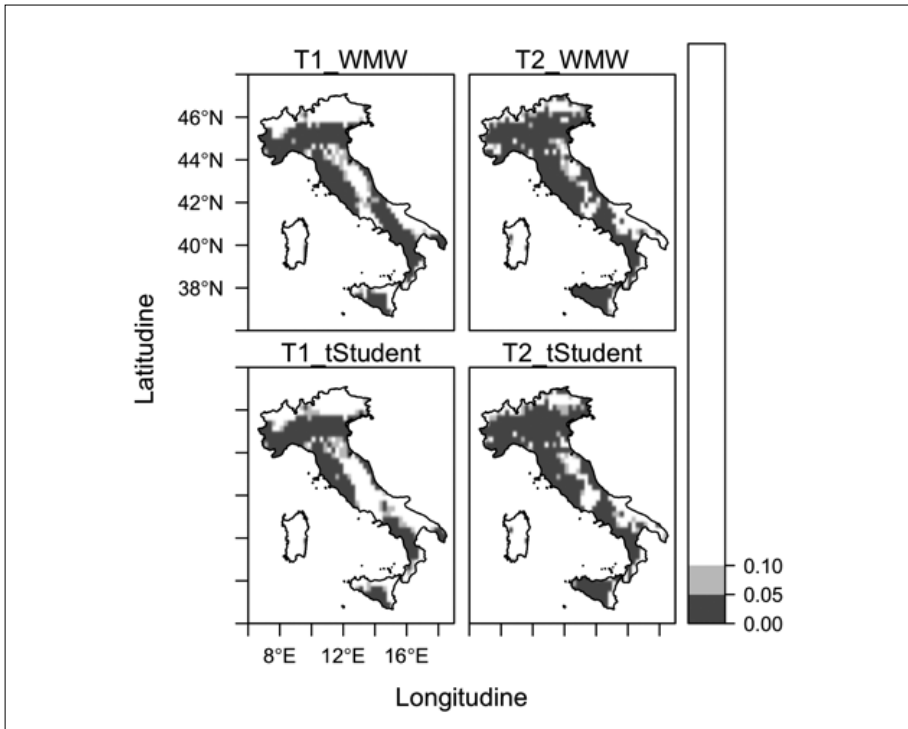


Fig. 12 Valori del *P-value* ottenuti dall'applicazione del test di Wilcoxon-Mann-Whitney (WMW) e di *t Student* sia nel caso T1 che T2 per la Temperatura Massima (valori significativi inferiori alle due soglie di accettazione di errore pari a 0.05 0.10)

del *P-value* ottenuti dall'applicazione del test WMW e *t Student*, l'esistenza di questa relazione è valida tanto per la TX quanto per la TN. Tuttavia mentre per la TN si riscontrano valori significativi pressoché in tutte le aree del territorio nazionale, per la TX sono escluse le zone Alpine e Appenniniche e la Sardegna.

È bene sottolineare che i risultati dei *tests* segnalano l'esistenza di una relazione diretta tra ondate di caldo e valori dell'indice WAHL, ma non possono dare indicazioni sulla causalità dei due fenomeni. Tuttavia, alcune considerazioni sulla dinamica della suddetta relazione possono dare delle indicazioni utili per lo sviluppo di un modello nel quale ricostruire la relazione stessa. Per esempio, se esaminiamo il risultato del *test* T1 e lo confrontiamo con il medesimo risultato del *test* T2 notiamo un'estensione delle aree ove il *test* risulta significativo e ciò è più evidente nel caso della TX. Questo risultato suggerisce che il legame tra WAHL e ondate di caldo è più forte che non tra WAHL e giorni caldi in genere, tanto più per la TX. Inoltre, l'analisi della relazione nei 15 giorni precedenti l'inizio dell'ondata

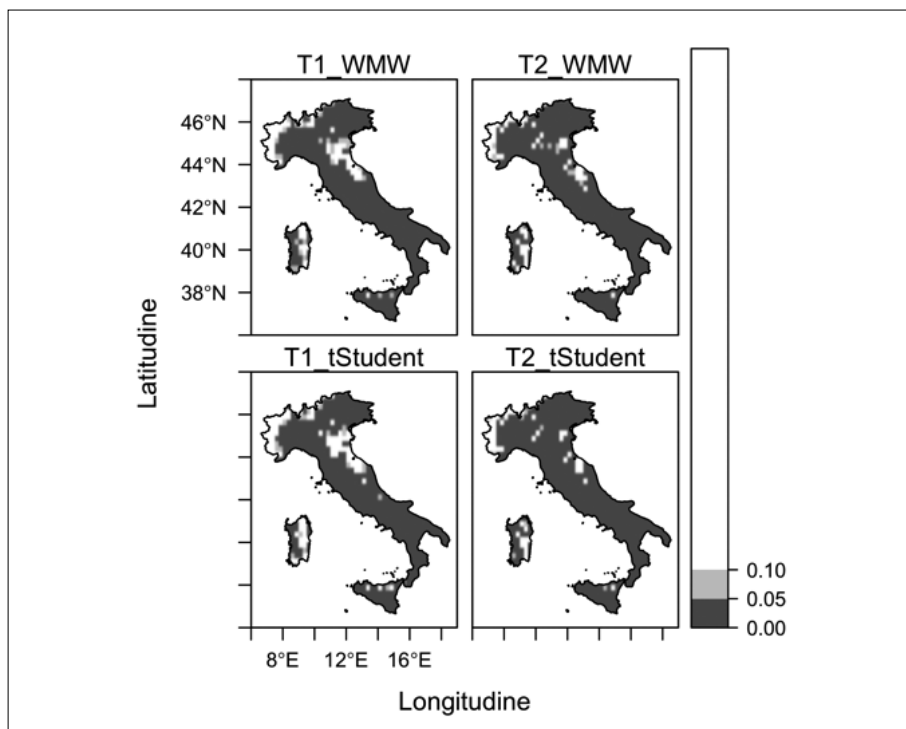


Fig. 13 Valori del P-value ottenuti dall'applicazione del test di Wilcoxon-Mann-Whitney (WMW) e di t Student sia nel caso T1 che T2 per la Temperatura Minima (valori significativi inferiori alle due soglie di accettazione di errore pari a 0.05 0.10)

di caldo permette di determinare una dinamica spazio-temporale delle variazioni che intercorrono tra i due fenomeni. Come si vede dalle figure 14 e 15, il quadro dinamico della relazione è ben distinto tra TX e TN. Infatti, la TX mostra una relazione attiva tra WAHL e tutti e 15 i giorni precedenti un' ondata di caldo, sebbene con specificità areali ben differenti lungo il corso di questi 15 giorni, mentre per la TN si evidenzia un decadimento tra il 6° e il 10° giorno, per poi rinforzarsi fino al 15° giorno. Ancora una volta, il segnale relativo alla TN è più diffuso in termini spaziali rispetto a quello della TX.

CONCLUSIONI

La variabilità climatica mostra un elevato grado di complessità, ma può essere scomposta in componenti più semplici per essere studiata approfonditamente.

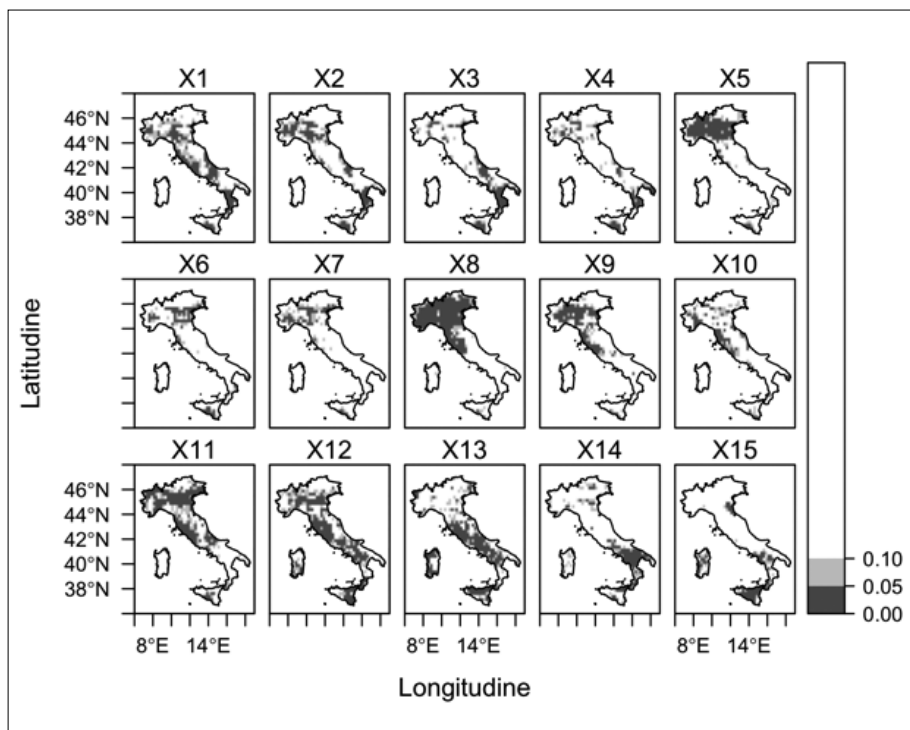


Fig. 14 Valori del P-value ottenuti dall'applicazione del test di Wilcoxon-Mann-Whitney (WMW) nel caso T3 relativamente ai 15 giorni precedenti l'inizio di un'ondata di caldo per la Temperatura Massima (valori significativi inferiori alle due soglie di accettazione di errore pari a 0.05 0.10)

La scomposizione in scale temporali permette di esaminare differenti tipi di variabilità e di attribuire un peso specifico a ciascuna di esse nel comporre il segnale osservato. Dall'analisi proposta risulta evidente come quasi la metà della variabilità dei valori di anomalie di temperatura media mensile del periodo Maggio-Settembre sia ascrivibile alle variazioni inter-annuali frutto delle interazioni tra i meccanismi climatici di larga scala. Tuttavia, risultano significativi i contributi dovuti a meccanismi di variabilità più lenta e caratterizzata da fasi decennali, che da sola determina il 25% della variabilità. Oltre un terzo della variabilità delle anomalie termiche medie, però, è determinata dal trend di lungo periodo in fase con il riscaldamento globale identificato. Tale impronta del cambiamento climatico in atto determina una considerevole pressione sugli ecosistemi e sulla salute umana e animale.

Inoltre gli eventi estremi termici determinati dalle ondate di caldo in Italia sono divenuti più frequenti a partire da metà degli anni '90 (Baldi et al.,

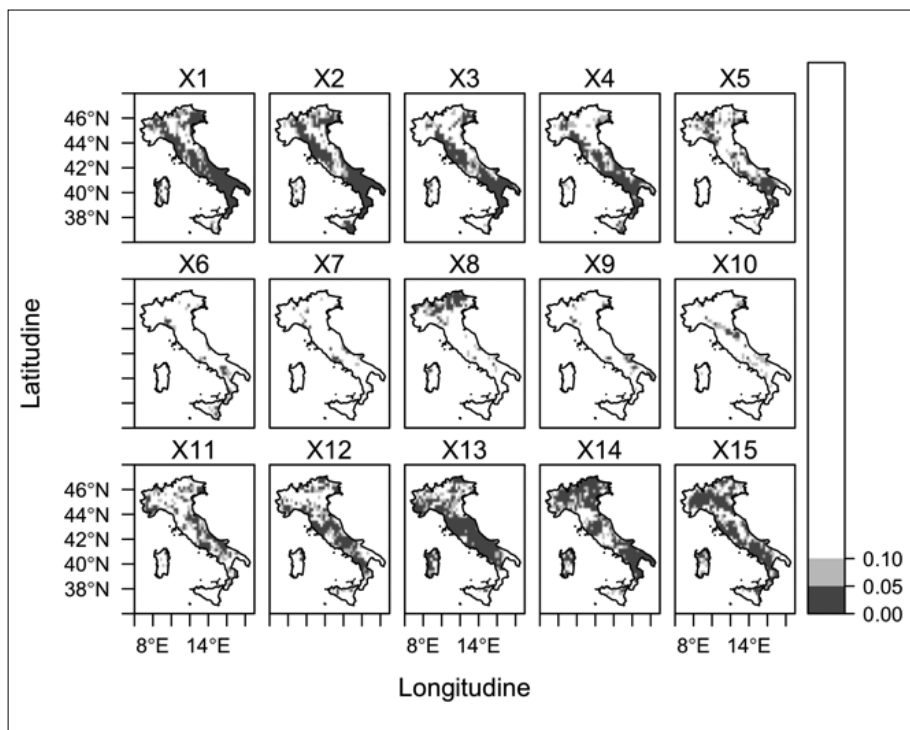


Fig. 15 Valori del *P*-value ottenuti dall'applicazione del test di Wilcoxon-Mann-Whitney (WMW) nel caso *T*3 relativamente ai 15 giorni precedenti l'inizio di un'ondata di caldo per la Temperatura Minima (valori significativi inferiori alle due soglie di accettazione di errore pari a 0.05 0.10)

2006; Lionello and Coauthors, 2009). Tale fenomeno, seppur meno regolare, sembra mostrare un trend crescente. Dalle analisi effettuate risulta che l'incremento delle ondate di caldo in questo periodo sia ascrivibile con maggior importanza alla Temperatura Minima.

In questo studio abbiamo poi mostrato un legame tra la variabilità del WAHL e un'ondata di caldo nella penisola italiana e questo legame è statisticamente significativo: la distribuzione dei valori giornalieri del WAHL, quando è in atto un'ondata di caldo, ha un valore centrale mediamente superiore alla stessa distribuzione quando non è in atto un'ondata. Analizzando poi la dinamica temporale delle variazioni che intercorrono tra i due fenomeni, i risultati ottenuti costituiscono una base importante per ulteriori approfondimenti sul nesso di causalità che esiste e un probabile supporto alla definizione di un modello specifico di previsione delle ondate di caldo a scala stagionale basato su meccanismi di larga scala.

RIASSUNTO

L'aumento della temperatura dell'aria nel bacino del Mediterraneo rappresenta una delle impronte più nitide del cambiamento climatico in atto legato principalmente alle attività antropiche. In questo studio viene proposta un'analisi della variabilità della temperatura media stagionale, delle ondate di calore e di un meccanismo atmosferico di grande scala coinvolto nello sviluppo e nel mantenimento delle ondate di calore stesse. I risultati mostrano come l'accelerazione del riscaldamento osservata negli ultimi anni sia legata all'aumento della frequenza delle ondate di calore, all'aumento dei giorni con valori di temperatura minima estrema. Infine viene mostrata una relazione funzionale statisticamente significativa tra ondate di calore in Italia e circolazione atmosferica di carattere nord africano.

ABSTRACT

The air temperature warming in the Mediterranean basin represents one of the observed climate change clearest footprints mainly related to the anthropic activities.

The long-term temperature variability has been analysed along with the heat waves occurrence in the last decades with one of the main related atmospheric forcing mechanism. Results highlights how heat waves frequency increased over last decades and that exists a robust functional dependence between heat waves in Italy and large-scale circulation over Northern Africa.

BIBLIOGRAFIA

- BALDI M., DALU G., MARACCHI G., PASQUI M., CESARONE F. (2006): *Heat waves in the Mediterranean: a local feature or a larger-scale effect?*, «Int. J. Climatol.», 26, pp. 1477–1487.
- BELTRANO M.C., DI GIUSEPPE E., ESPOSITO S., VENTO D. (2007): *Anomalie di temperatura e precipitazioni mensili calcolate sulle basi climatiche 1961-1990 e 1971-2000 in Italia*, «Osservatorio Agrometeorologico 2/2007», Supplemento al settimanale «Agricoltura Informazione», 46, pp. 9-13.
- BERTOCCHI L., VITALI A., LACETERA N., NARDONE A., VARISCO G., BERNABUCCI U. (2014): *Seasonal variations in the composition of Holstein cow's milk and temperature-humidity index relationship*, «Animal. », 8 (4), pp. 667-74.
- CHAUVIN F., ROEHRIG R., LAFORE J. P. (2010): *Intraseasonal variability of the Saharan heat low and its link with midlatitudes*, «J. Clim. », 23 (10), pp. 2544-2561.
- DONO G., CORTIGNANI R., DORO L., LACETERA N., LEDDA L., PASQUI M., MAZZAPICCHIO G. (2014): *An Integrated Assessment of the Productive and Economic Impacts Generated by Change in Climatic Variability in an Irrigated Mediterranean Area*, «QA-Rivista dell'Associazione Rossi-Doria», 4.
- EFTHYMIADIS D., GOODESS C.M., JONES P.D. (2011): *Trends in Mediterranean gridded temperature extremes and large-scale circulation influences*, «Nat. Hazards Earth Syst. Sci.», 11, pp. 2199-2214.

- GREENE A.M, GODDARD L., COUSIN R. (2011): *Web tool deconstructs variability in twentieth-century climate*, «Eos Trans. AGU», 92 (45), p. 397.
- HAYLOCK M.R., HOFSTRA N., KLEIN TANK A.M.G., KLOK E.J., JONES P.D., NEW M., (2008): *A European daily high-resolution gridded dataset of surface temperature and precipitation*, «J. Geophys. Res. (Atmospheres)», 113, D20119.
- HARRIS I., JONES P.D., OSBORN T.J., LISTER D.H. (2014): *Updated high-resolution grids of monthly climatic observations - the CRU TS3.10 Dataset*, «Int. J. Climatol.», 34, pp. 623-642.
- KALNAY E., KANAMITSU M., KISTLER R., COLLINS W., DEAVEN D., GANDIN L., IREDELL M., SAHA S., WHITE G., WOOLLEN J., ZHU Y., CHELLIAH M., EBISUZAKI W., HIGGINS W., JANOWIAK J., MO K.C., ROPELEWSKI C., WANG J., LEETMAA A., REYNOLDS R., JENNE R. AND JOSEPH D. (1996): *The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project*, «Bull. Amer. Meteor. Soc.», 77, pp. 437-471.
- KARL T.R., NICHOLLS N., GHAZI A. (1999): *CLIVAR/GCOS/WMO workshop on indices and indicators for climate extremes: Workshop summary*, «Climatic Change», 42, pp. 3-7.
- LIONELLO AND COAUTHORS (2009): *Eventi climatici estremi: tendenze attuali e clima futuro sull'Italia*, in Castellari S., Artale V. (a cura di), *I cambiamenti climatici in Italia: evidenze, vulnerabilità e impatti*, Bonomia University Press, Bologna.
- MANN H.B., WHITNEY D.R. (1947): *On a Test of Whether one of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other*, «Annals of Mathematical Statistics», 18 (1), pp. 50-60.
- MCMICHAEL A.J., WOODRUFF R.E., HALES S. (2006): *Climate change and human health: present and future risks*, «The Lancet», 859-869.
- PETERSON T.C., COAUTHORS (2002): *Report on the Activities of the Working Group on Climate Change Detection and Related Rapporteurs 1998-2001*, WMO, Rep. WCDMP-47, WMO-TD 1071, Geneve, Switzerland, pp. 1-143.
- SILLMANN J., KHARIN V.V., ZHANG X., ZWIERS F.W., BRONAUGH D. (2013a): *Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 1. Model evaluation in the present climate*, «J. Geophys. Res. Atmos.», 118, pp. 1716-1733.
- SILLMANN J., KHARIN V.V., ZHANG X., ZWIERS F.W., BRONAUGH D. (2013b): *Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 2. Future climate projections*, «J. Geophys. Res. Atmos.», 118, pp. 2473-2493.
- STUDENT (WILLIAM SEALY GOSSET) (1908): *The probable error of a mean*, «Biometrika», 6 (1), pp. 1-25.
- VITALI A., SEGNALE M., BERTOCCHI L., BERNABUCCI U., NARDONE A., LACETERA N. (2009): *Seasonal pattern of mortality and relationships between mortality and temperature-humidity index in dairy cows*, «J. Dairy Sci.», 92 (8), pp. 3781-90.
- WILCOXON F. (1945): *Individual comparisons by ranking methods*, «Biometrics Bulletin», 1 (6), pp. 80-83.