

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Dipartimento di Fisica e Astronomia “Augusto Righi”
Corso di Laurea in Fisica

Process-oriented and impact-based definitions of atmospheric heat extremes

Relatore:
Prof. Federico Porcù

Presentata da:
Marco Nebbia

Correlatore:
Dott. Paolo Ruggieri

Anno Accademico 2024/2025

Sommario

Le ondate di calore sono eventi meteorologici estremi con impatti rilevanti sulla salute umana, sull'ambiente e sulle infrastrutture. Tuttavia, la loro definizione varia significativamente a seconda delle metodologie adottate dalle diverse istituzioni meteorologiche e governative. Questo studio analizza i principali approcci alla classificazione delle ondate di calore, distinguendo tra definizioni complesse, basate sulla climatologia e sull'analisi storica dei dati, e definizioni semplificate, finalizzate alla valutazione dell'impatto sulla popolazione e alla prevenzione.

Attraverso l'utilizzo dei dataset ERA5, questo lavoro esplora il ruolo di indici termici avanzati, come l'UTCI (Universal Thermal Climate Index) e la MRT (Mean Radiant Temperature), nella quantificazione dello stress termico percepito. Questi indici si rivelano strumenti più accurati e rigorosi rispetto alla semplice temperatura dell'aria, comunemente impiegata come principale indicatore delle ondate di calore. L'analisi si concentra su due eventi estremi: il 27-28 luglio 1983 e il 6-7 luglio 2015. I due eventi presentano caratteristiche meteorologiche e climatologiche differenti, ma in entrambi, si evidenziano le limitazioni della temperatura dell'aria nel rappresentare adeguatamente il disagio termico.

Inoltre, per entrambi i periodi analizzati, lo studio indaga le cause atmosferiche che hanno determinato le ondate di calore, esaminando la circolazione generale dell'atmosfera e il ruolo delle diverse variabili meteorologiche che influenzano l'UTCI. Particolare attenzione è dedicata alla loro variazione rispetto ai valori medi climatologici, al fine di comprendere meglio i meccanismi che amplificano il disagio termico e migliorare le strategie di previsione e mitigazione.

Capitolo 1

Rianalisi Climatologica

1.1 Descrizione Generale

La rianalisi [ECM, 2023] è fondamentale per ricavare informazioni dettagliate e continue, dei fenomeni climatologici e meteorologici del passato, usando modelli di previsione numerica per l'atmosfera e assimilazione dei dati. La rianalisi climatologica è meno dettagliata rispetto alle previsioni meteorologiche quotidiane, ma è senza lacune, e a livello planetario. Come è possibile ottenere un tale risultato?

1.2 Processo di Rianalisi

Prima di tutto si stabilisce la risoluzione spaziale e temporale di nostro interesse, per ottenere la risoluzione spaziale si crea una determinata "mesh" per l'intero globo terrestre. Ovvero si suddivide quest'ultimo in tante cellette che possono essere di diversa dimensione, in base alla risoluzione richiesta, creando una vera e propria "griglia". Nel caso della rianalisi di ERA5 [ERA, 2025], è stata usata una celletta di dimensione (longitudine, latitudine) $0,25^\circ \times 0,25^\circ$. La risoluzione temporale invece è tipicamente nell'ordine delle ore o dei giorni; nell'esempio sottostante sono considerate le ore.

Dopodiché si sceglie su quali variabili fisiche ottenere la rianalisi (temperatura, pressione ecc..) e l'arco temporale di interesse (mesi, anni, decenni).

Una volta stabilite queste condizioni necessarie, per una raccolta dati sensata, iniziamo a raccogliere i dati "osservativi", lungo tutto il nostro periodo temporale. Questo avviene tramite stazioni meteorologiche, ma anche satelliti o ogni altro dispositivo che permetta un'accurata raccolta dati.

Si confrontano questi dati acquisiti direttamente, dalle previsioni meteorologiche a corto termine del passato, per valutare eventuali incoerenze. Infine tramite un processo

di "Data Assimilation" si correggono le incoerenze e si riempiono le cellette dove non erano presenti dati accurati.

Il risultato finale è la trattazione più attendibile e continua su tutto il globo del clima passato.

1.3 Esempio: Processo di rianalisi per un singolo istante temporale, 27 Settembre 2001 alle 14:00 CET

Supponiamo di voler ricostruire le condizioni atmosferiche globali per il 27 Settembre 2001 alle ore 14:00 CET. Il processo si articola nei seguenti passi:

1. Raccolta di dati osservativi

I dati disponibili provengono da:

- Stazioni meteorologiche a terra: temperatura, pressione, umidità, vento.
- Satelliti: copertura nuvolosa, temperatura superficiale degli oceani.
- Palloni sonda: profili verticali di temperatura e vento.
- Boe oceaniche: temperatura dell'acqua, pressione atmosferica.
- Aerei e navi: dati sparsi su pressione e vento.

Problema: Le osservazioni non coprono l'intero pianeta in modo uniforme e possono contenere errori strumentali.

2. Utilizzo di previsioni a breve termine del passato

- I modelli numerici di previsione meteorologica del passato hanno già prodotto previsioni a breve termine (es. 12 ore).
- Queste previsioni forniscono un quadro continuo e fisicamente coerente dell'atmosfera. Le previsioni aiutano a coprire le aree prive di osservazioni dirette.

3. Data Assimilation

- Il sistema di rianalisi confronta le osservazioni con le previsioni a breve termine e corregge i dati dove necessario.
- Se una stazione meteo riporta 1012 hPa e la previsione dice 1010 hPa, il modello rianalizzato può aggiustare il valore usando dati circostanti.
- Se una regione ha lacune nella raccolta dei dati, il sistema usa modelli numerici e dati vicini per stimare i valori.

4. Risultato Finale

Si ottiene un dataset completo e coerente per il 27 Settembre 2001 alle 14:00 CET, contenente informazioni su:

- Temperatura
- Pressione
- Vento
- Umidità
- Altri parametri fisici di interesse

per ogni punto della Terra, anche dove non erano disponibili osservazioni dirette.

Capitolo 2

Definizioni Ondate di Calore

Le ondate di calore sono periodi prolungati di temperature insolitamente elevate rispetto alle medie climatiche della regione in cui si verificano [Robinson, 2001]. Questi episodi di caldo intenso possono durare da alcuni giorni a diverse settimane e sono spesso accompagnati da alti livelli di umidità, scarsa ventilazione e assenza di precipitazioni. Le ondate di calore possono avere effetti significativi sulla salute umana, sull'ambiente e sull'economia, causando colpi di calore, siccità, incendi boschivi e stress sulle infrastrutture energetiche. Con il cambiamento climatico, la frequenza e l'intensità delle ondate di calore stanno aumentando in molte parti del mondo.

Il concetto di ondata di calore, non conosce una definizione univoca a livello globale, ma esistono un gran numero di definizioni diverse più o meno ufficiali e autorevoli in base ai diversi enti meteorologici e le "policy governative" nelle varie nazioni. Per lo studio delle ondate di calore, e intuire quali sono i corretti indici fisici da utilizzare, sono necessari un gran numero di dati storici che vengono completati e affinati tramite l'utilizzo della Rianalisi Climatologica descritta sopra.

Le varie definizioni si possono classificare in diversi modi: in base al numero di indici fisici, se l'indice fisico rappresenta un assoluto e un percentile, al tipo di variabile fisica che considero ecc...

Qui si propone una prima classificazione, nelle quattro distinte categorie elencate sotto:

- Definizioni con soglia percentile con unico indice
- Definizioni con soglia assoluta con unico indice
- Definizioni con EHF
- Definizioni a molti indici

Capitolo 3

Le Definizioni con soglia percentile

Innanzitutto, definiamo cosa si intende per soglia percentile nel caso di parametri fisici atmosferici. Prendiamo la temperatura come esempio, più vicino alla quotidianità. Se la temperatura media giornaliera supera il 90 percentile, vuol dire che prendendo i dati storici di quella giornata o di quel periodo, solo il 10% delle temperature medie giornaliere era più elevata. Per poter utilizzare correttamente soglia percentile occorrono un gran numero di dati storici a disposizione (forniti dalla rianalisi climatologica), altrimenti la statistica diventa inaccurata.

3.1 Definizione percentile per il National Weather Service (U.S.A)

La definizione percentile usata dal National Weather Service [[Robinson, 2001](#)], è la più autorevole su territorio americano, ed è integrata ai vari sistemi di allerta a livello nazionale. I dati storici utilizzati (indispensabili per una definizione percentile) sono quelli del National Climatic Data Center raccolti tra il 1951 e il 1990 da 178 stazioni meteorologiche sparse a livello nazionale.

L'unico indice utilizzato per determinare i valori soglia che caratterizzano l' "Heat Wave" è la temperatura apparente H_i , che unisce i valori di temperatura e di umidità. La cui formula risulta però molto complessa:

$$\begin{aligned}
H_i = & 16.923 + 0.185212\mathbf{T} + 5.37941\mathbf{R} \\
& + 7.28898 \times 10^{-3}\mathbf{R}^2 + 3.45372 \times 10^{-4}\mathbf{T}^2\mathbf{R} \\
& - 3.8646 \times 10^{-9}\mathbf{T}^3 + 2.91583 \times 10^{-5}\mathbf{R}^3 \\
& + 1.42721 \times 10^6\mathbf{T}^3\mathbf{R} + 1.97483 \times 10^{-7}\mathbf{TR}^3 \\
& - 2.18429 \times 10^{-8}\mathbf{T}^3\mathbf{R}^2 + 8.43296 \times 10^{-10}\mathbf{T}^2\mathbf{R}^3 \\
& - 8.14971 \times 10^{-4}\mathbf{TR}^2 + 1.02102 \times 10^{-3}\mathbf{T}^2\mathbf{R}^2 \\
& - 4.81975 \times 10^{-11}\mathbf{T}^3\mathbf{R}^3 + 0.5_1 \\
& - 0.100254\mathbf{TR} + 9.4169 \times 10^{-3}\mathbf{T}^2
\end{aligned} \tag{3.1}$$

Dove T ed R rappresentano rispettivamente la temperatura ($^{\circ}F$) e l'umidità relativa.

In generale un' "Heat Wave" è definita come un periodo di almeno 48 ore dove la temperatura apparente massima giornaliera non scende mai sotto i $105^{\circ}F$ ($40.5^{\circ}C$) e la minima giornaliera non scende mai sotto gli $80^{\circ}F$ ($26.7^{\circ}C$), ma vista la vastità degli Stati Uniti questa definizione assoluta diviene una definizione percentile in alcune regioni più calde. Infatti in alcune zone, soprattutto nel sud del paese, questi valori di temperatura così elevati non sono insoliti e allora viene utilizzato la soglia percentile del 99% per due giorni consecutivi. Dove chiaramente tale soglia percentile rappresenta valori di temperatura percepita più elevata.

Inoltre l'**N.W.S** prende in considerazione anche eventi più lievi: gli "Hot Spell" e gli "Warm Spell". Rimanendo in zone dove i valori soglia per le "Heat Waves" rappresentano una soglia percentile maggiore del 99%, definisco gli "Hot Spell" come quegli eventi, dove per due giorni H_i massima giornaliera e H_i minima giornaliera si attestano tra i valori soglia e il 99%. Mentre allo stessa maniera definisco gli "Warm Spell" come quegli eventi compresi tra il 99% e il 98% percentile. Per completezza viene mostrata sotto un' immagine esplicativa, rappresentante la definizione di "Heat Wave", "Hot Spell" e "Warm Spell", in ogni regione geografica degli Stati Uniti.

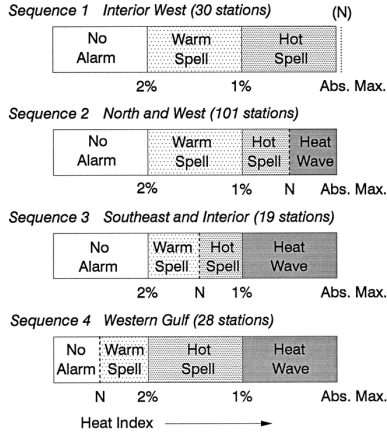


Figura 3.1: Con N sono indicati i valori di soglia definiti sopra, si nota come nelle regioni meridionali del paese tali valori sono minori del 99% percentile, addirittura anche del 98% percentile, e ciò richiede una ridefinizione delle "Heat Waves", "Hot Spells" e "Warm Spells"

3.2 Definizione percentile per la China University of Geosciences, Wuhan (China)

Lo studio svolto dall' Univeristà di Wuhan [Song et al., 2022], non è il modello ufficiale usato dalla Cina per prevedere e prevenire le "heat waves", (vedremo a seguito che il modello ufficiale di prevenzione è più semplicistico) ma risulta essere assai completo, in quanto alterna diversi limiti percentili e due distinti indici fisici, la Temperatura $T(^{\circ}\text{C})$ e la Temperatura percepita $H_i(^{\circ}\text{C})$.

Per raccogliere i dati necessari allo studio statistico, sono stati utilizzati i dati da "CN05.1." del periodo compreso tra il 1961 e il 2017. Le definizioni percentili e le soglie risultano essere assolutamente identiche sia se considerato $H_i(^{\circ}\text{C})$ oppure $T(^{\circ}\text{C})$. Si mostra sotto la formula necessaria per il calcolo di $H_i(^{\circ}\text{C})$

$$\begin{aligned}
H_i = & -8.784695 + 1.61139411 \cdot T - 2.339549 \cdot RH \\
& - 0.14611605 \cdot T \cdot RH - 1.2308094 \times 10^{-2} \cdot T^2 \\
& - 1.6424828 \times 10^{-2} \cdot RH^2 + 2.211732 \times 10^{-3} \cdot T^2 \cdot RH \\
& + 7.2546 \times 10^{-4} \cdot T \cdot RH^2 + 2.211732 \times 10^{-3} \cdot T^2 \cdot RH
\end{aligned} \tag{3.2}$$

Dove T ed RH rappresentano rispettivamente la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e l'umidità relativa, tale formula è sviluppata per comodità computazionale.

- Il primo limite percentile usato è chiamato "ABS", dove a ogni provincia cinese viene associato lo stesso limite, senza quindi guardare alla variabilità geografica e climatica del paese. Questa soglia percentile risulta essere consistente per la Cina Orientale, ma spesso inaccurato in altre regioni. Si definiscono tre diverse tipologie di "Heat Waves" in base alla loro gravità, ognuno di questi eventi per essere definito una "Heat Waves" deve superare con la H_i massima giornaliera o la T massima giornaliera, la soglia percentile corrispondente per almeno 3 giorni. Con un percentile maggiore del 99% si tratta di un evento grave, con un percentile compreso tra il 95% e il 99% si tratta di un evento moderato, con un percentile compreso tra il 90% e il 95% di un evento minore.
- Il secondo limite percentile è chiamato QTL. Nel QTL l'intero territorio cinese è suddiviso in griglie e per ogni mesh della griglia viene definita una diversa soglia percentile per la definizione di "Heat Waves". Ciò permette una più efficace definizione nei luoghi geograficamente distanti dai principali centri del paese, per i quali l' ABS è stata definita ad Hoc.
- Il terzo limite è invece chiamato " QTL_{mov} ", ed oltre a una diversità spaziale per le soglie percentili, introduce anche una diversità temporale, ovvero le soglie non sono tutte uguali nell'arco di un anno. Potrebbero esserci periodi nell'arco dell'anno con valori tendenzialmente più omogenei e altri meno, e quindi le soglie vengono aggiustate periodo per periodo. Si usa una finestra temporale minima di 15 giorni, quindi i giorni tra il 1 e il 15 Gennaio avranno una stessa soglia, che però risulterà diversa da quella tra il 15 Gennaio e il 30 Gennaio. Risulta quest'ultimo il metodo più accurato, ma certamente il più complesso.

3.3 Definizione percentile in Lettonia

In Lettonia [Hooyberghs, 2023] è definita un' ondata di calore come un qualsiasi periodo di sei giorni consecutivi, tra Maggio e Agosto, durante il quale la temperatura massima giornaliera è superiore al 90% percentile rispetto alla temperatura massima media del periodo. I dati statistici sono quelli dell' EUROCORDEX dal 1971 al 2000.

3.4 Definizione percentile in Ungheria

In Ungheria [Hooyberghs, 2023] un' ondata di calore è un periodo di 3 giorni consecutivi nei quali la temperatura media giornaliera supera il 90% percentile rispetto alla temperatura media giornaliera del periodo. Si definisce dal 15 Maggio al 15

Settembre che rappresenta il periodo nel quale le ondate di calore possono essere un rischio concreto per la salute pubblica.

	dati storici	durata H.W	Indici Usati	percentile	dipendenza percentile
N.W.S U.S.A	1951-1990	2 giorni	H_i	fisso, 99% o 98%	variabile nel territorio
ABS China	1961-2017	3 giorni	H_i, T	90%, 95%, 99%	fisso
QTL China	1961-2017	3 giorni	H_i, T	variabile	variabile nel territorio
QTL_m China	1961-2017	3 giorni	H_i, T	variabile	variabile terr. e tempo
Lettonia	1971-2000	6 giorni	T	90%	fisso
Ungheria	-	3 giorni	T	90%	fisso

Tabella 3.1: La tabella mostra schematicamente le varie definizioni di ondate di calore con soglie percentili.

Capitolo 4

Le Definizioni con soglia Assoluta

Le definizioni con soglia assoluta, prevedono un limite fissato, di solito la temperatura, oltre il quale si è in presenza di una "Heat Wave". sono spesso le più semplici da comprendere e le più immediate da attuare nelle emergenze. Per tale motivo sono usate da molte istituzioni e governi nel mondo, con notevole differenza nelle soglie utilizzate in base al clima locale. Vediamo sotto una lista comprensiva della varie definizioni di "Heat Waves" con soglia assoluta:

- **Department of Epidemiology of the Regional Health service in Italy:** In Italia [Hooyberghs, 2023] non è definita un' unica soglia, ma ci sono singole soglie per ogni città e per ognuno dei cinque mesi dell'anno nei quali le ondate di calore possono essere un danno per la salute pubblica. Inoltre non è usata la semplice T , ma la H_i , dove viene considerata anche l'Umidità Relativa. Viene sotto illustrata una tabella illustrativa con quattro città di esempio Figura 4.1.
- **World Meterological Organization:** cinque giorni consecutivi nei quali la temperatura massima giornaliera è superiore di 5°C rispetto alla temperatura massima media per quel periodo [Song et al., 2022].
- **Royal Netherlands Meterological Istitute:** cinque giorni consecutivi con temperatura massima giornaliera superiore ai 25°C [Song et al., 2022].
- **Chinese National Meterological Administration:** tre giorni consecutivi con temperatura massima giornaliera superiore a 33°C [Song et al., 2022].
- **Polish Plan 2022:** il governo polacco [Zofia, 2023] usa tre diverse definizioni di "Heat Waves" a seconda della loro gravità. Un evento lieve è definito quando la temperatura massima giornaliera è compresa tra i 30°C e i 34°C e la minima rimane al di sotto dei 18°C , per due giorni consecutivi. Un evento moderato è definito quando la temperatura massima giornaliera è compresa tra i 30°C e i 34°C

City	Month	T threshold	City	Month	T threshold
Bolzano	5	31.5	Ancona	5	30.5
Bolzano	6	32.5	Ancona	6	32.5
Bolzano	7	32.5	Ancona	7	35.5
Bolzano	8	32.5	Ancona	8	35.5
Bolzano	9	32.5	Ancona	9	35.5
Torino	5	29.5	Pescara	5	29.5
Torino	6	31.5	Pescara	6	34.5
Torino	7	33.5	Pescara	7	36.5
Torino	8	35.5	Pescara	8	37.5
Torino	9	35.5	Pescara	9	37.5

Figura 4.1: Sono qui raffigurati i diversi limiti di H_i per i vari mesi in quattro città italiane: Bolzano, Torino, Ancona e Pescara.

e la minima sale al di sopra dei 18°C , per due giorni consecutivi. Un evento grave è definito quando la temperatura massima giornaliera è superiore ai 34°C per due giorni consecutivi.

- **Spanish Plan, ministero de sanidad 2022:** il ministero della sanità spagnolo [Zofia, 2023] usa tre diverse definizioni di "Heat Waves" in base alla loro gravità. Un evento lieve è definito quando la temperatura massima giornaliera è maggiore 34°C e la minima sopra ai 22°C , per due giorni consecutivi. Un evento moderato è definito quando la temperatura massima giornaliera è maggiore 34°C e la minima sopra ai 22°C , per tre o quattro giorni consecutivi. Un evento grave è definito quando la temperatura massima giornaliera è maggiore 34°C e la minima sopra ai 22°C , per cinque o più giorni consecutivi.
- **Belgio :** in Belgio [Hooyberghs, 2023] viene definita un' ondata di calore, quando contemporaneamente la temperatura minima giornaliera supera i 18.2°C e la massima i 28.6°C per un periodo di 3 giorni tra Aprile e Settembre compresi.
- **Finlandia:** In Finlandia [Hooyberghs, 2023] viene definita un'ondata di calore, se una singola giornata presenta una temperatura media maggiore di 20°C , e una temperatura massima superiore ai 27°C

- **Svezia:** in Svezia [Hooyberghs, 2023] un' ondata di calore è un periodo dove la temperatura massima giornaliera è superiore a 30°C per cinque giorni consecutivi.
- **Lituania:** In Lituania [Hooyberghs, 2023] un' ondata di calore è un qualsiasi giorno dove la temperatura massima giornaliera è superiore a 30°C tra Maggio e Settembre.
- **Public Health England:** In Inghilterra [Hooyberghs, 2023] non è definita un' unica soglia, ma differisce regione per regione, anche se, a differenza del caso italiano, non cambiano di mese in mese, ma rimangono costanti nel periodo tra il primo Giugno e il 15 Settembre, quando le ondate di calore possono essere un rischio per la salute pubblica.

Regions UK	Tmax	Tmin
London	32	18
South East	31	16
South West	30	15
Eastern	30	15
West Midlands	30	15
East Midlands	30	15
North West	30	15
Yorkshire and Humber	29	15
North East	28	15

Figura 4.2: Sono qui raffigurati i diversi limiti di T_m e T_M , giornalieri per diverse regioni dell' Inghilterra.

Capitolo 5

Definizioni con EHF

l'EHF o Excess Heat Factor rappresenta un indice attraverso il quale si può intuire o meno la presenza di una "Heat Wave". Tale indice unisce l'approccio percentile a quello assoluto. L'EHF originariamente creato in Australia, ha visto una successiva diffusione globale, qui proponiamo tale definizione, utilizzata del governo francese [Kanti et al., 2022] nella previsione delle ondate di calore in 16 diverse città del paese . I dati statistici al fine dello studio sono stati raccolti dal 2000 al 2015 nei mesi compresi tra Maggio e Settembre.

l'EHF ci da o meno conferma se in 72 ore, tre giorni, è avvenuta o meno un' ondata di calore, in particolare:

- EHF > 0 ondata di calore moderata
- EHF > 5 ondata di calore forte
- EHF > 10 ondata di calore estrema

Ma come si calcola l'EHF?

Di seguito sono riportate le formule per il calcolo dell'Excess Heat Factor (EHF) [RJ, 2014] e i relativi commenti esplicativi.

1. Temperatura media su 3 giorni

$$T_3(t) = \frac{T(t) + T(t-1) + T(t-2)}{3} \quad (5.1)$$

Commento:

- $T(t)$ rappresenta la temperatura del giorno t (ad esempio, la temperatura massima o la media giornaliera).

- La media su 3 giorni, che include il giorno corrente e i due giorni precedenti, serve a ridurre la variabilità delle misurazioni giornaliere e a catturare le tendenze a breve termine.

2. Temperatura media sui 30 giorni precedenti

$$T_{30}(t) = \frac{1}{30} \sum_{i=3}^{32} T(t-i) \quad (5.2)$$

Commento:

- L'intervallo considerato va da $t-3$ a $t-32$, ovvero copre i 30 giorni immediatamente precedenti il periodo di 3 giorni analizzato.
- Questo valore fornisce un riferimento per valutare il livello di acclimatazione, confrontando le condizioni attuali con quelle del passato recente.

3. Soglia percentile (95° percentile)

$$T_{95}(t)$$

Commento:

- $T_{95}(t)$ rappresenta il 95° percentile della distribuzione storica delle temperature (o delle medie su 3 giorni) per il periodo dell'anno in esame.
- Questo valore indica che, storicamente, solo il 5% dei valori ha superato tale soglia, e viene usato per identificare eventi di calore eccezionali.

4. Indice di significatività del calore (EHI_{sig})

$$EHI_{sig}(t) = T_3(t) - T_{95}(t) \quad (5.3)$$

Commento:

- Se $EHI_{sig}(t)$ è positivo, significa che la temperatura media su 3 giorni supera il 95° percentile.
- Questo indice quantifica l'intensità dell'evento di caldo confrontandolo con la climatologia storica.

5. Indice di acclimatazione (EHI_{accl})

$$\text{EHI}_{\text{accl}}(t) = T_3(t) - T_{30}(t) \quad (5.4)$$

Commento:

- Questo indice misura la differenza tra la temperatura media dei 3 giorni attuali e quella dei 30 giorni precedenti.
- Un valore positivo indica che il periodo attuale è significativamente più caldo rispetto al periodo di acclimatazione, suggerendo una variazione brusca nelle condizioni climatiche.

6. Calcolo dell'Excess Heat Factor (EHF)

$$\text{EHF}(t) = \begin{cases} \text{EHI}_{\text{sig}}(t) \times \text{EHI}_{\text{accl}}(t), & \text{se } \text{EHI}_{\text{sig}}(t) > 0 \text{ e } \text{EHI}_{\text{accl}}(t) > 0, \\ 0, & \text{altrimenti.} \end{cases} \quad (5.5)$$

Capitolo 6

Definizioni a molti indici

Le definizioni a molti indici [Robinson, 2001], sono le più complete e precise, ma anche più complesse, perciò sono usate spesso da enti di ricerca e da istituti meteorologici, ma quasi mai adottate da istituzioni responsabili di calamità naturali. Forniamo a seguito alcuni esempi:

ID	Indicator name	Definitions	Units
SU25	Summer days	Annual count when TX (daily maximum) > 25°C	Days
ID0	Ice days	Annual count when TX (daily maximum) < 0°C	Days
TR20	Tropical nights	Annual count when TN (daily minimum) > 20°C	Days
FD0	Frost days	Annual count when TN (daily minimum) < 0°C	Days
TXx	Max Tmax	Annual maximum value of daily maximum temp	°C
TXn	Min Tmax	Annual minimum value of daily maximum temp	°C
TNx	Max Tmin	Annual maximum value of daily minimum temp	°C
TNn	Min Tmin	Annual minimum value of daily minimum temp	°C
TX90p	Warm days	Percentage of days when TX > 90th percentile	%
TX10p	Cool days	Percentage of days when TX < 10th percentile	%
TN10p	Cool nights	Percentage of days when TN < 10th percentile	%
TN90p	Warm nights	Percentage of days when TN > 90th percentile	%
GSL	Growing season length	Annual (1 Jan–31 Dec in NH) count between first span of at least 6 days with TG > 5°C and first span after 1 July of 6 days with TG < 5°C	Days
DTR	Diurnal temperature range	Annual mean difference between TX and TN	°C
WSDI	Warm spell duration indicator	Annual count of days with at least 6 consecutive days when TX > 90th percentile	Days
CSDI	Cold spell duration indicator	Annual count of days with at least 6 consecutive days when TN < 10th percentile	Days
RX1day	Max 1-day precipitation amount	Annual maximum 1-day precipitation	mm
RX5day	Max 5-day precipitation amount	Annual maximum consecutive 5-day precipitation	mm
SDII	Simple daily intensity index	Annual total precipitation divided by the number of wet days (defined as PRCP ≥ 1.0 mm) in the year	mm day ⁻¹
R10	Number of heavy precipitation days	Annual count of days when PRCP ≥ 10 mm	Days
R20	Number of very heavy precipitation days	Annual count of days when PRCP ≥ 20 mm	Days
R25	Number of days above 25 mm	Annual count of days when PRCP ≥ 25 mm, 25 is user-defined threshold	Days
CDD	Consecutive dry days	Maximum number of consecutive days with RR < 1 mm	Days
CWD	Consecutive wet days	Maximum number of consecutive days with RR ≥ 1 mm	Days
R95p	Very wet days	Annual total PRCP when RR > 95th percentile	mm

Figura 6.1: Sono elencati i 27 indici usati dall' ETCCDI per studiare le ondate di calore e altri fenomeni estremi

- La World Meteorological Organization (WMO) introduce il primo modello a multi indici, per lo studio delle Heat Waves, con grande consenso da parte della comunità scientifica, nel terzo IPCC del 2001.
- Frich, P., et al. nel 2002 introduce 10 indici per lo studio delle ondate di calore di cui 5 legati alla temperatura, e rimangono ancora oggi estremamente robusti e utilizzati.
- Nel 2002 Il progetto congiunto della Commissione di Climatologia del WMO e del Programma Mondiale di Ricerca sul Clima, sulla Variabilità e Prevedibilità del Clima (ETCCDI) ha sviluppato un insieme di 27 indici, 17 dei quali legati alla temperatura. La lista ETCCDI include una varietà di soglie relative e assolute, nonché indicatori basati sulla durata del fenomeno.

Capitolo 7

ERA5 dataset

Per prevedere gli eventi futuri, è fondamentale conoscere le condizioni iniziali, ossia i valori di tutte le variabili rilevanti in un determinato punto del pianeta in un preciso momento. Questo processo, denominato analisi, è un elemento cruciale nei sistemi di previsione numerica del tempo.

Una rianalisi opera secondo lo stesso principio, ma utilizzando le condizioni del passato, consentendo così di ricostruire le condizioni meteorologiche anche in periodi e luoghi dove le osservazioni erano scarse o assenti. ERA5 [ERA, 2025] rappresenta la quinta generazione delle rianalisi dell' ECMWF (centro europeo per le previsioni meteorologiche a medio termine) ed è il risultato del lavoro di decine di ricercatori sin dagli anni '80, quando l'ECMWF iniziò a produrre le sue prime rianalisi. Il dataset ERA5, un'evoluzione di ERA-Interim, (iniziato nel 2006 dall' ECMWF e coprente inizialmente un periodo a partire dal 1975), ora estende la copertura dal 1940 fino ai giorni nostri.

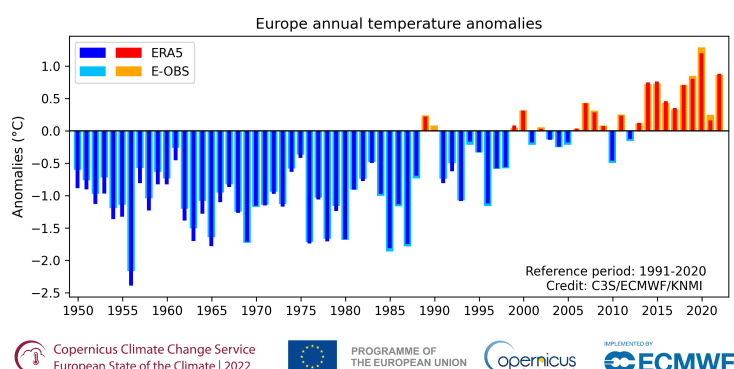


Figura 7.1: Sono visibili i dati storici sulla temperatura in Europa elaborati dal dataset di ERA5

Il principio alla base delle rianalisi dell' ECMWF è quello di fornire “mappe complete”, raccogliendo il maggior numero possibile di informazioni su numerose variabili che descrivono le condizioni passate del sistema Terra e integrandole con dati derivanti dalle simulazioni dei modelli per colmare le lacune presenti nelle osservazioni. Questo approccio mira a offrire un quadro ininterrotto del clima passato, che può essere confrontato con quello attuale, risultando uno strumento prezioso sia per valutare l'evoluzione climatica sia per formulare proiezioni sul futuro.

Ad esempio, nell' ultima edizione dell' European State of the Climate, i dati di ERA5 hanno evidenziato che il 2022 è stato il secondo anno più caldo per l'Europa a partire dal 1950, come si nota dalla figura 5.

Il dataset ERA5 offre una rianalisi completa delle condizioni atmosferiche, della superficie oceanica e del terreno per ogni ora, a partire dal 1° gennaio 1940 fino a 2 mesi fa. Basato sull'approccio di assimilazione dei dati dell' ECMWF, integra un vasto numero di osservazioni con le leggi della fisica, incorporate nelle equazioni dei modelli di previsione meteorologica. Grazie a questa metodologia, ERA5 rappresenta una delle ricostruzioni più precise del meteo passato in qualsiasi punto del pianeta.

Le osservazioni storiche vengono costantemente arricchite con dati in situ, operazioni di recupero dati e la rielaborazione dei dati satellitari, garantendo archivi sempre più completi. ERA5 fornisce stime globali orarie con una risoluzione orizzontale di circa 31 km, ovvero una suddivisione in griglie di longitudine latitudine pari a $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, e 137 livelli verticali, che vanno dalla superficie fino a 0,01 hPa (circa 80 km di altitudine). Questo è il dataset più indicato per ottenere informazioni sulle condizioni atmosferiche a livello globale, nonché per analizzare le onde oceaniche e numerose variabili della superficie terrestre.

Esiste un altro DATASET chiamato ERA5T, parallelo a ERA5 che a differenza di ERA5 riesce ad aggiornarsi con dati provenienti da soli 5 giorni fa, chiaramente ciò compromette lievemente l'accuratezza.

Ma quali sono gli indici, le variabili fisiche che l'ERA5 riesce ad analizzare costantemente in tutto il mondo? In tutto sono centinaia, ma vediamo ora un esempio dove ne vengono utilizzate alcune:

7.1 Stress termico, esempio di utilizzo del dataset ERA5

Questo dataset fornisce una ricostruzione storica completa di una serie di indici che rappresentano lo stress termico e il disagio umano in condizioni esterne. Anche conosciuto come ERA5-HEAT (Human Thermal Comfort - Comfort Termico Umano), rappresenta

lo stato dell'arte attuale nella produzione di record di dati bio-climatologici, e sarà proprio uno dei dataset utilizzati per le analisi successive, vedi paragrafo 9.

Il dataset è organizzato attorno a due variabili principali:

la temperatura media radiante (MRT) e l'indice universale di clima termico (UTCI). Queste variabili descrivono come il corpo umano percepisce le condizioni atmosferiche, nello specifico temperatura dell'aria, umidità, ventilazione e radiazione, ma vediamo ora nello specifico.

Nome	Unità di misura	Descrizione
Temperatura media radiata	°K oppure °C	La temperatura media radiante, in relazione a una data persona posta in un dato ambiente, è definita come quella temperatura che servirebbe a un corpo nero fittizio (coefficiente di emissione = 1) per avere lo stesso scambio termico che avviene tra il soggetto e l'ambiente nella realtà .
Indice climatico termico universale	°K oppure °C	Rappresenta la risposta fisiologica del corpo umano a uno stress termico dell'ambiente esterno, e si misura in °C.

Tabella 7.1: Una descrizione di due tra i moltissimi indici di ERA5

Capitolo 8

UTCI

Nel 2009 è stato creato l' Universal Thermal Climate Index (UTCI da ora in avanti) [Pappenberge, 2020], un indice a mutli-variabile che a oggi, è la più accurata rappresentazione della sinergia tra copro umano e ambiente durante sia eccessi termici negativi che positivi. È infatti la variabile più utilizzata dalle rianalisi climatologiche, per individuare episodi di ondate di calore nel passato. Sorge però spontanea la seguente domanda. Perché nelle definizioni dedite alla prevenzione rispetto alle ondate di calore viste fino ad ora, non compare l'UTCI in nessun caso?

L'UTCI, come vedremo a breve, è una variabile fisica estremamente complessa, che richiede un gran numero di dati e complessità computazionale, che male si adatta per una definizione dedita alla prevenzione, che deve essere facilmente comprensibile e velocemente attuabile.

L'UTCI è una temperatura equivalente ($^{\circ}\text{C}$ o $^{\circ}\text{K}$), che misura la risposta fisiologica umana all'ambiente termico. Descrive gli scambi di calore tra l'ambiente termico e il corpo umano, vale a dire il bilancio energetico, tenendo in considerazione anche la fisiologia e l'abbigliamento. Ciò è possibile perché l'UTCI si basa sul modello UTCI-Fiala, che combina un modello avanzato di termoregolazione del corpo umano, con un modello adattivo dedito a simulare l'abbigliamento, in ogni condizione ambientale. La temperatura equivalente che caratterizza l'UTCI è quindi la temperatura effettiva ambientale, corretta da una moltitudine di fattori.

Ci sono 10 categorie di UTCI che corrispondono a specifiche risposte fisiologiche umane all'ambiente termico. Le categorie si riferiscono ai valori come segue ($^{\circ}\text{C}$):

1. sopra + 46: stress da calore estremo
2. Da + 38 a + 46: molto forte stress termico;
3. Da + 32 a + 38: forte stress termico;

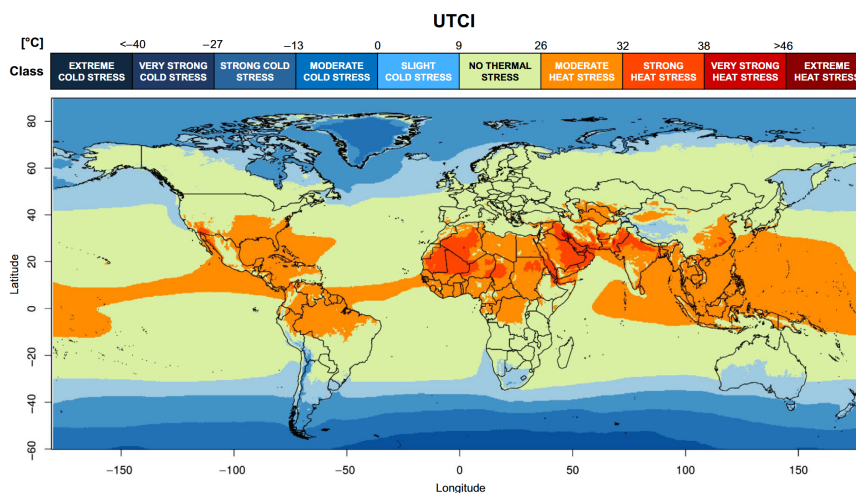


Figura 8.1: Una proiezione, dove si vedono le suddivisioni dei 10 livelli di UTCI a livello globale, come media dei valori del mese di Luglio tra il 1981 e il 2010, dati raccolti dal dataset ERA 5

4. Da + 26 a + 32: moderato stress termico;
5. Da + 9 a + 26: nessun stress termico;
6. Da + 9 a 0: leggero stress freddo;
7. Da 0 a -13: stress da freddo moderato;
8. Da -13 a -27: forte stress freddo;
9. Da -27 a -40: molto forte stress freddo;
10. sotto -40: stress freddo estremo.

L'indice universale del clima termico (UTCI) viene solitamente calcolato utilizzando i dati della rianalisi ECMWF ERA5, la prima ad aver svolto una rianalisi sull' UTCI (e sull' MRT, variabile che vedremo in seguito necessaria per il calcolo dell' UTCI), ma ancora considerata la più accurata.

8.1 Calcolo dell' UTCI

Il calcolo dell' UTCI è estremamente complesso, la formula esatta non verrà qui riportata, in quanto è un polinomio con oltre 120 termini, ma dipende da solo quattro variabili:

- Temperatura dell'aria a 2 metri

- Temperatura del punto di rugiada a 2 metri (o umidità relativa)
- Velocità del vento a 10 metri
- Mean Radiant Temperature(MRT)

8.2 MRT

La Mean Radiant Temperature (MRT) è una variabile che rappresenta il contributo della radiazione solare, e della radiazione termica, nel comfort fisiologico del corpo umano.

La radiazione solare o ad onde corte:

- È l'energia emessa dal Sole, che arriva sulla Terra sotto forma di onde elettromagnetiche.
- Ha una lunghezza d'onda compresa tra 0.3 e 3 μm (ultravioletto, visibile e infrarosso vicino).
- La sua intensità è massima intorno a 0.5 μm (luce visibile, giallo-verde).
- Si propaga attraverso il vuoto e viene assorbita, riflessa e diffusa dall'atmosfera e dalla superficie terrestre.

La radiazione termica o ad onde lunghe:

- È l'energia riemessa dalla Terra e dall'atmosfera sotto forma di radiazione infrarossa.
- Ha una lunghezza d'onda (λ) più lunga, compresa tra 4 e 100 μm (infrarosso termico).
- Viene riemessa dai gas serra nell'atmosfera (CO_2 , vapore acqueo, metano, ecc.), contribuendo all'effetto serra.
- Viene riemessa dal suolo terrestre una volta che quest'ultimo ha assorbito radiazione solare.

Il calcolo dell' MRT avviene tramite un algoritmo in tre fasi.

1. Nella prima fase viene calcolato il fattore di proiezione superficiale f_p . Il fattore di proiezione superficiale rappresenta la porzione di superficie corporea esposta alla radiazione solare diretta. Per una persona in piedi o che cammina, viene calcolato dall'angolo di elevazione solare γ come (Jendritzky et al. 1990), dove γ è l'angolo

complementare all'angolo zenitale solare, che ha valore 90° , quando il sole si trova direttamente al di sopra dell'osservatore. (γ in gradi).

$$f_p = 0.308 \cos \left(\gamma \left(0.998 - \frac{\gamma^2}{50000} \right) \right) \quad (8.1)$$

Formula per il calcolo del fattore di proiezione superficiale, a partire dell'angolo di elevazione solare

2. La seconda fase calcola la radiazione termica e solare, ciascuna composta da due componenti. Per la radiazione termica, calcolo la componente termica discendente dall'atmosfera (emessa dai gas dopo che hanno assorbito radiazione solare) $L_{\text{surf}}^{\text{dw}}$ e la componente termica ascendente dal suolo (emessa dal suolo dopo che ha assorbito radiazione solare) $L_{\text{surf}}^{\text{up}}$.
Mentre per la radiazione solare esiste una componente diretta proveniente dal sole I^* e una componente diffusa, quest'ultima pari alla somma del flusso di radiazione solare diffusa isotropa (ovvero quella componente di radiazione solare che viene diffusa isotropicamente dall'atmosfera) $S_{\text{surf}}^{\text{diff}}$ e del flusso di radiazione solare riflessa dalla superficie del suolo $S_{\text{surf}}^{\text{up}}$.
3. Nella terza fase, il fattore di proiezione della superficie e i cinque componenti della radiazione vengono inseriti nella seguente formula per calcolare l'MRT.

$$MRT = \left\{ \frac{1}{\sigma} \left[f_a L_{\text{surf}}^{\text{dw}} + f_a L_{\text{surf}}^{\text{up}} + \frac{\alpha_{ir}}{\varepsilon_p} (f_a S_{\text{surf}}^{\text{diff}} + f_a S_{\text{surf}}^{\text{up}} + f_p I^*) \right] \right\} \quad (8.2)$$

dove σ è la costante di Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$), α_{ir} è il coefficiente di assorbimento della superficie corporea irradiata dalla radiazione solare (valore standard 0,7), ε_p è l'emissività del corpo umano vestito (valore standard 0,97) e f_a a è un fattore angolare. Il fattore f_a a è standardizzato su 0,5, il che corrisponde a considerare l'ambiente circostante a un corpo umano come costituito solo da un emisfero inferiore (terra) e da un emisfero superiore (cielo). Questa ipotesi è valida per la maggior parte delle applicazioni su grandi scale.

In verità l'MRT da solo è già un indice termico, ed è interessante osservare la relazione tra MRT e UTCI.

Confrontando la *Figura 8.1* e la *Figura 8.2* si possono trarre delle importanti conclusioni: I valori di MRT e UTCI più elevati si riscontrano in quasi tutto l'emisfero settentrionale (ricordiamo che le proiezioni sono di Luglio), e nelle regioni tropicali. Si possono poi riconoscere variazioni regionali, legate principalmente al tipo di superficie terrestre e alla

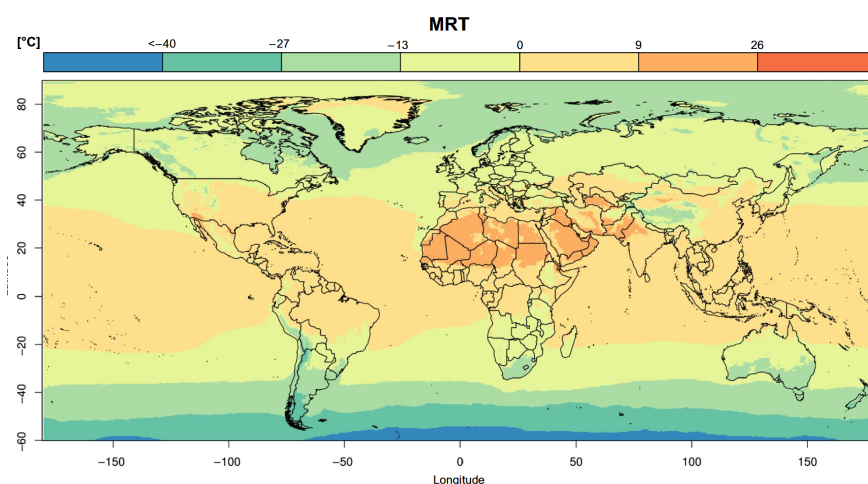


Figura 8.2: Una proiezione, dove si osservano i vari valori di MRT a livello globale, come media dei valori del mese di Luglio tra il 1981 e il 2010, dati raccolti dal dataset ERA 5

topografia. Ad esempio, i valori MRT sono generalmente più alti nelle aree desertiche, dove la bassa nuvolosità e l'elevata albedo aumentano la porzione di radiazione solare incidente sul suolo e da essa riflessa. Si possono osservare differenze anche per l' UTCI con valori in aree montuose come le Ande e l'altopiano tibetano che sono generalmente inferiori rispetto ai loro dintorni.

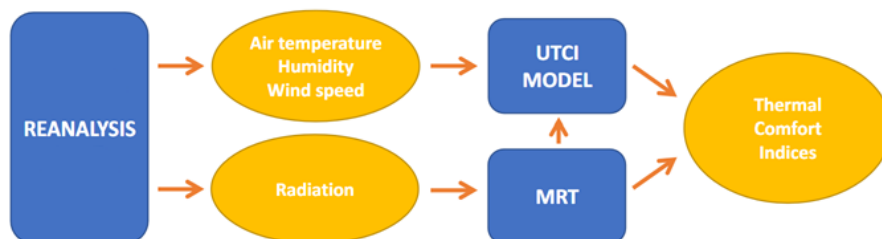


Figura 8.3: Diagramma sulla costruzione degli indici termici dell' MRT e dell' UTCI

8.3 Velocità del vento

La velocità del vento a 10 metri di quota non è facilmente ricavabile dai diversi dataset, mentre è molto facile trovare la velocità del vento zonale U_{10} (est-ovest), e quella

meridionale V_{10} (nord-sud), e successivamente ricavare il totale dal teorema di Pitagora.

$$V = \sqrt{(U_{10})^2 + (V_{10})^2} \quad (8.3)$$

8.4 temperatura a 2 metri dal suolo

La temperatura a 2 metri dal suolo rappresenta la temperatura dell'aria misurata a 2 metri di altezza, che è lo standard utilizzato in meteorologia per rappresentare la temperatura dell'aria percepita dall'uomo.

8.5 Umidità Relativa

L'umidità relativa (RH) è la quantità di vapore acqueo presente nell'aria rispetto alla massima quantità possibile a una data temperatura. È espressa in percentuale (%).

Si calcola dalla formula:

$$RH = \frac{e}{e_s} \times 100 \quad (8.4)$$

Dove:

- RH è l'umidità relativa
- e pressione effettiva del vapore acqueo
- e_s pressione di saturazione del vapore acqueo, che dipende dalla temperatura

La RH si calcola normalmente non a livello del suolo, bensì, per motivi orografici, a una pressione di circa 850 hPa .

8.6 Confronto tra UTCI e i parametri ambientali

Lo studio [Novak, 2013] analizza le relazioni tra le quattro variabili che caratterizzano l'UTCI e l'UTCI stesso. Per quanto riguarda i valori della temperatura dell'aria, il calcolo è stato effettuato a intervalli compresi tra -10°C e $+30^\circ\text{C}$ (l'intervallo comune di temperatura dell'aria nell'Europa centrale). Ed È stato utilizzato un passo di cinque gradi. Per le altre tre caratteristiche meteorologiche da cui dipende l'UTCI, due sono costanti e la terza è variabile.

La dipendenza dell'UTCI dalla parte radiante è descritta dalla differenza tra la temperatura dell'aria e la mean radiant temperature (Fig. 8.7), perchè non semplicemente l'MRT? Che relazione sussiste tra MRT e T?

- Se $MRT > T$, significa che la radiazione termica proveniente dall'ambiente circostante è maggiore della temperatura dell'aria, aumentando lo stress termico da caldo.
- Se $MRT < T$, significa che l'ambiente radiante è più freddo rispetto alla temperatura dell'aria, favorendo una perdita di calore per irraggiamento e riducendo lo stress da caldo.

Nella figura 8.7 sono stati utilizzati i valori costanti dell'umidità relativa (RH=50%) e della velocità del vento ($V = 1 \frac{m}{s}$). Le successive due dipendenze dell'UTCI rispetto alla velocità del vento (Figura 8.5) e all'umidità relativa (Figura 8.6) sono state costruite in modo simile. Per lo studio della reazione tra l' UTCI e la velocità del vento sono stati scelti i valori costanti dell'umidità relativa (RH=50%), e della differenza tra MRT e temperatura (MRT-T), con un MRT fissato. Le costanti di riferimento sono invece ($V = 1 \frac{m}{s}$) e MRT-T, con MRT fissato, per calcolare la dipendenza dell' UTCI dall'umidità relativa.

Prima di analizzare gli andamenti, ci dobbiamo porre la seguente domanda. Esistono delle correlazioni lineari tra i vari parametri e l' UTCI [Zare et al., 2018]? La risposta è sì ma ciò dipende dal parametro in questione.

- La correlazione tra UTCI e MRT-T è generalmente positiva e forte (coefficiente di correlazione lineare a RH e V fissati ≈ 0.5).
- La correlazione tra UTCI e RH è generalmente positiva e debole (coefficiente di correlazione lineare a V e MRT fissati ≈ 0.3)
- La correlazione tra UTCI e V è generalmente negativa e debole (coefficiente di correlazione lineare a RH e MRT fissati ≈ -0.2 vedi figura 8.4)
- è inoltre utile ricordare anche la dipendenza tra UTCI e Temperatura, mantenendo costanti gli altri tre parametri. La relazione ha un coefficiente di correlazione prossimo a 1 (≈ 0.9), quindi come ci si aspetta estremamente forte e positivo, in quanto è il parametro che più influenza il valore dell'UTCI, tanto che in molte definizioni di ondate di calore, viene utilizzata la temperatura, invece dell' UTCI, vedi paragrafo 4.

Ora procediamo all'analisi concreta dei grafici.

Al crescere dell'umidità relativa, l'UTCI aumenta in quanto un aumento dell' umidità riduce l' efficacia della sudorazione e dell' evaporazione, ostacolando la dispersione del calore corporeo e intensificando lo stress termico percepito. Questo effetto è particolarmente marcato a temperature elevate, dove un'umidità elevata amplifica la sensazione di disagio. Tuttavia, a temperature più basse, l'umidità ha un impatto minore, poiché

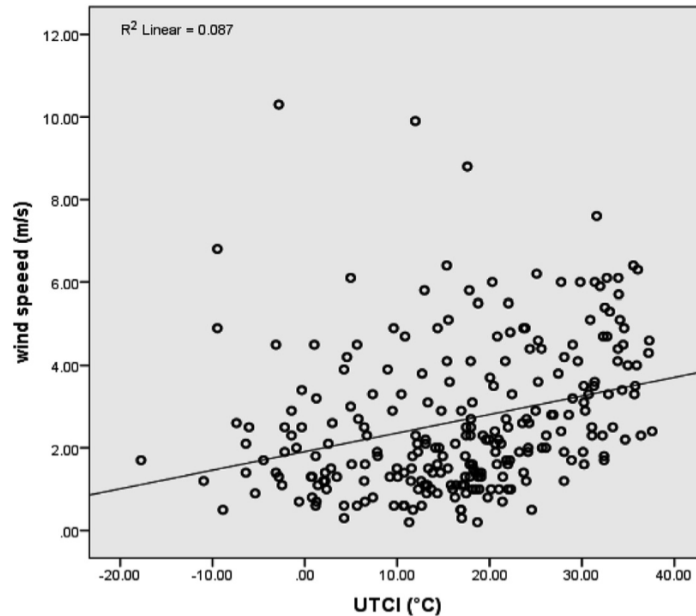


Figura 8.4: esempio di un grafico di correlazione tra velocità del vento e UTCI, mantenendo costanti le altre variabili

il corpo dissipa il calore principalmente attraverso la convezione e non tramite evaporazione, si può notare perciò un aumento della pendenza delle curve quando aumenta la temperatura in *figura 8.5*.

All' aumentare della velocità del vento, l' UTCI percepito diminuisce, ma ciò dipende dalla temperatura. A temperature elevate, il vento favorisce il raffreddamento evaporativo e la dispersione del calore corporeo, riducendo l' UTCI. Tuttavia, a basse temperature, un aumento della velocità del vento intensifica la perdita di calore per convezione, abbassando di nuovo l'UTCII, ma amplificando lo stress da freddo. Si veda *Figura 8.6*.

Secondo la *Figura 8.7* i valori di UTCI aumentano significativamente quando la radiazione contribuisce in modo rilevante al bilancio energetico della superficie corporea (cioè quando la differenza $MRT-T$ è positiva). La differenza tra la temperatura dell'aria e l' UTCI è molto piccola in condizioni di bassa radiazione $MRT \approx T$, ma in condizioni di radiazione intensa (tipicamente con cielo sereno nel primo pomeriggio), i valori di UTCI possono essere fino a 10°C superiori rispetto alla temperatura dell'aria. Questo conferma la necessità di includere il fattore radiante nella costruzione di un indice biometeorologico, soprattutto nei mesi estivi.

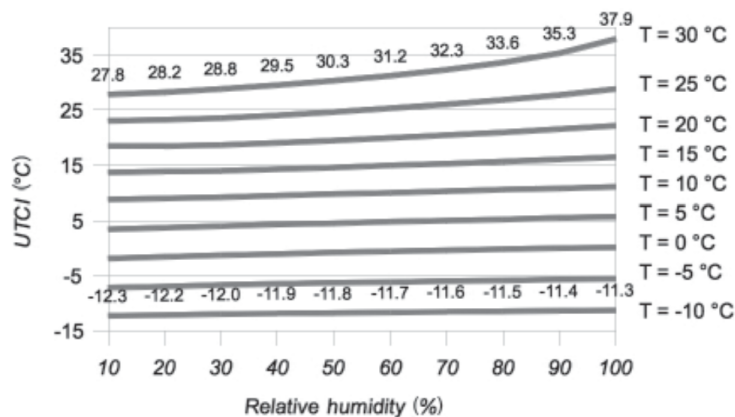


Figura 8.5: Andamento dell' UTCI in funzione dell'umidità relativa a diverse temperature

La dipendenza dell' UTCI dalla velocità del vento sembra essere molto forte, specialmente a temperature dell'aria più basse, vedi Figura 8.6. Tuttavia, nel grafico, il comportamento dell' UTCI per velocità del vento superiori a ($V = 20 \frac{m}{s}$) risulta anomalo.

Per affrontare questa problematica, sono state costruite curve teoriche dell' UTCI in funzione della velocità del vento per valori superiori a ($V = 10 \frac{m}{s}$). Sono stati riscontrati due problemi principali:

1. Intervallo tra ($V = 20 \frac{m}{s}$) e ($V = 30 \frac{m}{s}$): L' UTCI aumenta invece di diminuire con l'aumento della velocità del vento, in contrasto con l'assunto teorico secondo cui un vento più forte dovrebbe avere un effetto di raffreddamento più marcato, vedi figura 8.8.
2. Velocità superiori a ($V = 30 \frac{m}{s}$): I valori di UTCI diminuiscono molto rapidamente all'aumentare della velocità del vento, addirittura scendendo sotto 0 K ($-273,15^\circ\text{C}$), il che non è fisicamente plausibile, vedi figura 8.9.

Come soluzione, è stato suggerito di fissare il valore della velocità del vento a ($V = 20 \frac{m}{s}$), poiché l'effetto aggiuntivo del raffreddamento del vento oltre questa soglia è trascurabile.

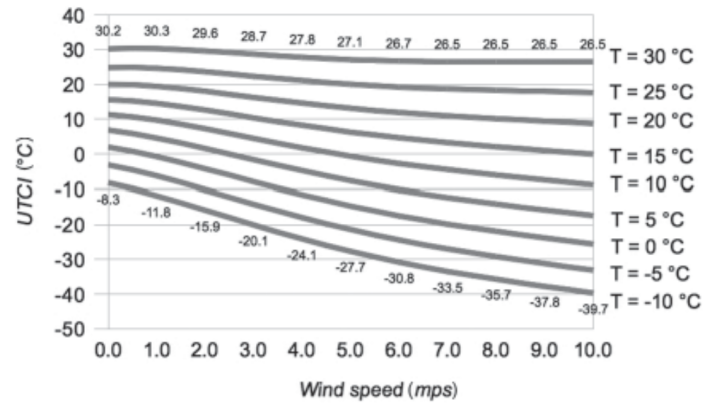


Figura 8.6: *Andamento dell' UTCI in funzione della velocità del vento, a diverse temperature*

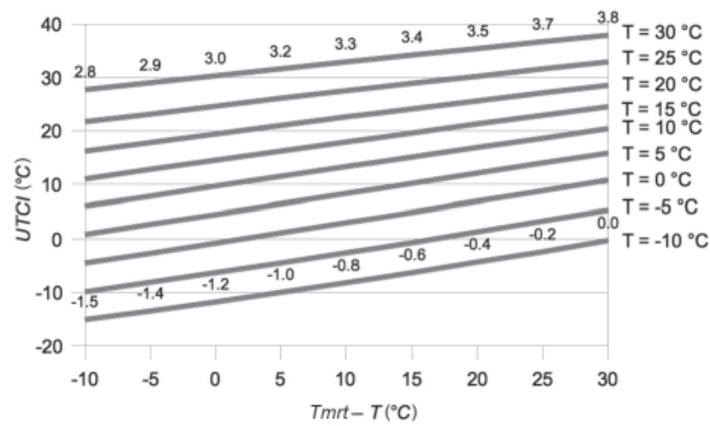


Figura 8.7: *Andamento dell'UTCII in funzione della differenza tra MRT e temperatura ambiente, a diverse temperature*

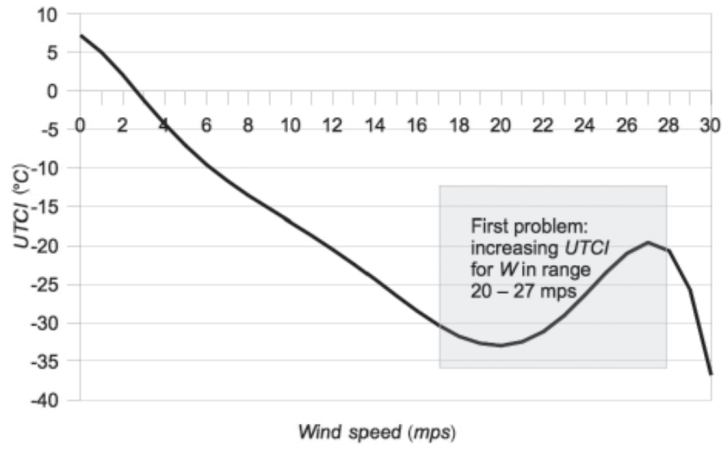


Figura 8.8: andamento anomalo dell' UTCI per venti superiori a ($V = 20 \frac{m}{s}$)

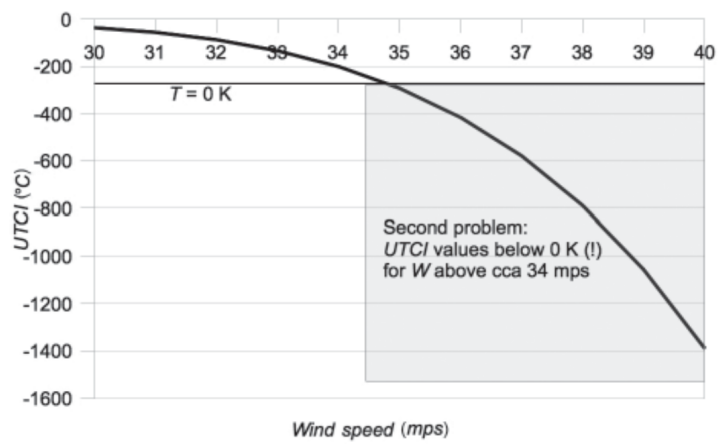


Figura 8.9: Si nota il crollo dei valori di UTCI, per velocità del vento molto grandi, fino a superare lo zero assoluto

Capitolo 9

Introduzione allo studio

Ci proponiamo ora di analizzare 4 giornate particolari, il 27-28 Luglio 1983 e il 6-7 Luglio 1983. Perché queste quattro giornate sono di interesse meteorologico e climatologico? Esse rappresentano situazioni che ufficialmente non rappresentano un pericolo per la popolazione, in quanto la temperatura risulta al di sotto dei limiti imposti dalle varie agenzie dedite alla prevenzione delle ondate di calore e quindi non viene deliberato uno stato di emergenza climatico. Ma nonostante ciò i valori di UTCI, e quindi di stress termico effettivo sentito dalla popolazione sono comunque molto alti.

Il focus di entrambe le analisi è il territorio dell'Emilia Romagna, ma per fare ciò, sono necessari dati e variabili meteorologiche di tutta Europa. Si propone quindi di suddividere lo studio in:

- Datasets di ERA5
- verifica delle incertezze sui dataset
- Raccolta e manipolazione dei dati
- analisi delle variabili meteorologiche per il 27-28 Luglio 1983 e per il 6-7 Luglio 2015.
- Risultati e Conclusioni

Capitolo 10

Datasets di ERA5

La raccolta dati avviene tramite il dataset della rianalisi ERA5. Quali sono le variabili scelte ed analizzate?

L'UTCI e le quattro variabili da cui dipende, Temperatura a 2 metri dal suolo, velocità del vento a 10 metri, MRT, e umidità relativa. Inoltre è stata analizzata anche la pressione a livello del mare, e il geopotenziale utili per valutare la circolazione generale dell'atmosfera, i centri di bassa e alta pressione e per il bilancio geostrofico del sistema.

Il dataset ERA5, non è un unico dataset, ma al suo interno ne presenta un gran numero, in riferimento al tipo di variabile per la quale si vuole ottenere la rianalisi.

10.1 ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present

"ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present", [[Hersbach et al., 2023](#)] è il dataset più utilizzato, che contiene il maggior numero di variabili, e rappresenta il più ambizioso risultato della rianalisi di ERA5. *Single Levels*, indica che per le variabili sto considerando un unico "livello verticale", ovvero un' unica quota atmosferica di riferimento, ma che può variare di variabile in variabile. Ulteriori caratteristiche peculiari sono visibili in *figura 10.1*, oltre che già discusse nel *paragrafo 7*.

Un' unica necessaria precisazione è il formato dei dati di uscita, infatti oltre a GRIB, esistono anche i dati in formato NetCDF (.nc), più pratici per le successive analisi climatologiche.

Quali sono le variabili raccolte da tale dataset?

- La temperatura a 2 metri di altezza
- La pressione a livello del mare
- la componente zonale del vento, raccolta a 10 metri di altezza

- la componente meridionale del vento, raccolta a 10 metri di altezza

Come si può osservare ciascuna di queste variabili non dipende dalla quota, è sempre fissata, per cui sono a "livello singolo".

Data description	
Data type	Gridded
Projection	Regular latitude-longitude grid
Horizontal coverage	Global
Horizontal resolution	Reanalysis: 0.25° x 0.25° (atmosphere), 0.5° x 0.5° (ocean waves) Mean, spread and members: 0.5° x 0.5° (atmosphere), 1° x 1° (ocean waves)
Temporal coverage	1940 to present
Temporal resolution	Hourly
File format	GRIB
Update frequency	Daily

Figura 10.1: *Le caratteristiche principali del "ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present"*

10.2 ERA5 hourly data on pressure levels from 1940 to present

Rispetto al dataset a livello singolo, nel dataset a livelli di pressione [Brune, 2023], sono presenti anche un gran numero di livelli verticali, più precisamente 37, come si vede dalla *figura 10.2* da 1 hPa a 1000 hPa. Ulteriori caratteristiche peculiari, sono descritte in *Figura 10.2*, oltre che già definite nel *paragrafo 7*.

Un' unica necessaria precisazione è il formato dei dati di uscita, infatti oltre a GRIB, esistono anche i dati in formato NetCDF (.nc), più pratici per le successive analisi climatologiche.

Quali sono le variabili raccolte da tale dataset?

- L'umidità relativa, i cui dati vengono raccolti a 850 hPa, circa 1500 metri, per motivi orografici.
- Geopotenziale, i cui dati vengono raccolti a 850 hPa, circa 1500 metri, per motivi orografici.

Data description	
Data type	Gridded
Projection	Regular latitude-longitude grid.
Horizontal coverage	Global
Horizontal resolution	Reanalysis: 0.25° x 0.25° Mean, spread and members: 0.5° x 0.5°
Vertical coverage	1000 hPa to 1 hPa
Vertical resolution	37 pressure levels
Temporal coverage	1940 to present
Temporal resolution	Hourly
File format	GRIB
Update frequency	Daily

Figura 10.2: *Le caratteristiche principali dell' "ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present"*

10.3 Thermal comfort indices derived from ERA5 reanalysis

Si tratta di un dataset a singolo livello verticale [Di Napoli et al., 2020], le variabili di comfort termico vengono prese per l'appunto solo a livello della superficie, dove hanno un' influenza sulla vita umana. Ulteriori caratteristiche peculiari, sono descritte in *Figura 10.3*, oltre che già definite nel *paragrafo 7*. Per le variabili di comfort termico, esiste un solo formato per i dati di uscita, che è il NetCDF (.nc).

Quali sono le variabili raccolte da tale dataset?

- L'MRT (Mean Radiant Temperature)
- L'UTCI (Universal Thermal Climate Index)

Data description

Data type	Gridded
Projection	Regular latitude-longitude grid
Horizontal coverage	Global except for Antarctica (90N-60S, 180W-180E)
Horizontal resolution	0.25° × 0.25°
Vertical resolution	Surface level
Temporal coverage	From January 1940 to near real time for the most recent version.
Temporal resolution	Hourly data
File format	NetCDF
Conventions	Climate and Forecast (CF) Metadata Convention v1.6
Versions	v1.1 (latest), v1.0 (deprecated). A new version is expected to be released in early 2023. This new version uses the new thermofeel library. The data will be made available in GRIB format.
Update frequency	Intermediate dataset updated daily in near real time. Consolidated dataset monthly updates with 2-3 month delay behind real time.

Figura 10.3: *Le caratteristiche principali del "Thermal comfort indices derived from ERA5 reanalysis"*

Capitolo 11

Incertezza sui dati di ERA5

Uno degli aspetti chiave di ERA5 è la sua capacità di fornire una stima dell'incertezza associata alle variabili meteorologiche [ECMWF, 2024]. Questo viene realizzato attraverso un sistema di ensemble di rianalisi (ERA5 EDA - Ensemble of Data Assimilations), che permette di quantificare l'affidabilità delle previsioni climatiche e meteorologiche.

11.1 Il Sistema di Ensemble

L'ensemble di ERA5 è composto da 10 membri, ognuno dei quali rappresenta una diversa realizzazione delle condizioni atmosferiche. Questi membri sono ottenuti introducendo perturbazioni nei dati iniziali e nei parametri del modello, in modo da simulare l'incertezza nelle osservazioni e nella fisica atmosferica. Ogni ensemble fornisce una possibile configurazione dell'atmosfera, e la loro dispersione fornisce una misura dell'errore statistico nelle variabili analizzate.

Le perturbazioni introdotte possono essere suddivise in tre categorie principali:

- **Perturbazioni nei dati iniziali:** Piccole variazioni nei dati osservati per riflettere errori di misurazione o interpolazione.
- **Perturbazioni nei parametri fisici:** Differenze nelle formule utilizzate per modellare processi atmosferici come la turbolenza e la radiazione.
- **Assimilazione differenziata dei dati:** Piccole variazioni nel modo in cui le osservazioni vengono assimilate nel modello per simulare l'incertezza nell'elaborazione.

11.2 Calcolo dell'Incertezza nei Dati di ERA5

L'incertezza di una variabile meteorologica in ERA5 viene stimata calcolando la deviazione standard dei valori ottenuti dai 10 membri dell'ensemble. La formula utilizzata è:

$$\sigma_X = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \quad (11.1)$$

dove:

- σ_X è l'incertezza stimata della variabile X.
- X_i è il valore della variabile nel membro dell'ensemble.
- \bar{X} è il valore medio della variabile su tutti gli ensemble.
- N è il numero di membri dell'ensemble (in ERA5).

11.3 Esempio

L'incertezza nei dati di rianalisi ERA5 viene stimata utilizzando un ensemble di 10 membri, che fornisce una misura della dispersione dei dati e dell'affidabilità delle previsioni climatiche. In questo documento, calcoliamo l'incertezza sulla temperatura a 2 metri (T) in una regione specifica.

Consideriamo una griglia ERA5 composta da 100 celle (ciascuna con una risoluzione di 0.25° x 0.25°) e 10 membri di ensemble. La temperatura per ciascuna cella e ensemble è riportata nella tabella seguente:

Cella	Ensemble 1	Ensemble 2	Ensemble 3	...	Ensemble 10
1	20.0	20.2	19.9	...	20.1
2	19.8	20.0	19.7	...	19.9
...
100	21.3	21.5	21.1	...	21.2

Tabella 11.1: Esempio di dati di temperatura per 100 celle in 10 ensemble.

La formula utilizzata per l'incertezza è:

$$\sigma_T = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^2} \quad (11.2)$$

Dove:

- σ_T è l'incertezza totale della temperatura.
- T_i è il valore della temperatura del membro i dell'ensemble.
- \bar{T} è la media della temperatura su tutti i membri.
- $N = 10$ è il numero di membri dell'ensemble.

Supponiamo che l'incertezza nelle osservazioni iniziali sia $0.1^\circ C$, allora il calcolo diventa:

$$\sigma_T = \sqrt{\frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} (T_i - \bar{T})^2} \quad (11.3)$$

Dopo il calcolo :

- **Media della temperatura (T):** $19.2^\circ C$
- **Incetezza stimata:** $0.27^\circ C$

Da non considerare i valori numerici, che sono solo di esempio e non calcolati (ovviamente).

11.4 Incertezza delle variabili di interesse

Le variabili meteorologiche fornite dal dataset ERA5, presentano diverse incertezze legate alla natura dei processi atmosferici e alla qualità dei dati assimilati [meteoblue,], e nella sezione precedente si è mostrato come avviene la determinazione di tali incertezze. In generale, le variabili che dipendono fortemente dalla parametrizzazione del modello, come la velocità del vento e l'umidità relativa, tendono ad avere incertezze maggiori rispetto a variabili più stabili come la pressione atmosferica. Ciò significa che la sua rappresentazione nel modello atmosferico non si basa direttamente su equazioni fisiche esatte, ma è approssimata attraverso formule empiriche o semplificazioni matematiche. Queste formule sono chiamate parametrizzazioni e vengono utilizzate per descrivere processi atmosferici che avvengono a scale più piccole della risoluzione del modello. Infatti i modelli numerici del tempo e del clima, come ERA5, dividono l'atmosfera in una griglia tridimensionale con celle di circa 31 km di lato, ma alcuni fenomeni atmosferici, come la formazione delle nuvole, la turbolenza o i piccoli vortici del vento, avvengono a scale molto più piccole e non possono essere direttamente simulati. Per questo, vengono rappresentati attraverso parametrizzazioni, ovvero formule che ne descrivono l'effetto medio sulla scala del modello.

Si osservano qui in particolare le incertezze legate alle variabili meteorologiche di interesse:

- **Velocità del vento:** L'incertezza nella previsione della velocità del vento a 10 metri è compresa tra 1,5 e 1,7 m/s utilizzando modelli di previsione meteorologica attuale, e circa 1,5 m/s per i dati storici utilizzando il modello di rianalisi ERA5.
- **Temperatura a 2 metri di altezza:** La temperatura dell'aria a 2 metri è calcolata con un' incertezza di circa 1,5 K utilizzando il modello di rianalisi ERA5.
- **Umidità relativa:** La precisione del modello per la temperatura di rugiada, strettamente correlata all'umidità relativa, presenta valori di incertezza di circa 1,6 °K per un modello di rianalisi.
- **Pressione al livello del mare:** La pressione atmosferica è generalmente una delle variabili più stabili nei modelli meteorologici, con incertezze relativamente basse rispetto ad altre variabili.
- **Geopotenziale:** Il geopotenziale, come la pressione al livello del mare, è una delle variabili più stabili nei modelli meteorologici, con incertezze relativamente basse rispetto ad altre variabili.
- **MRT (Mean Radiant Temperature) e UTCI (Universal Thermal Climate Index):** Questi indici di comfort termico sono derivati da variabili meteorologiche come temperatura dell'aria, umidità relativa, velocità del vento e radiazione solare. L'incertezza associata a MRT e UTCI dipende quindi dall'accuratezza di queste variabili di input. Poiché la velocità del vento e l'umidità relativa hanno incertezze relativamente elevate, anche MRT e UTCI possono risentire di queste imprecisioni.

Tutte le incertezze possono variare in base alla regione geografica e al periodo dell'anno, influenzate da fattori locali come la topografia e le condizioni atmosferiche prevalenti. Inoltre la risoluzione spaziale e temporale del modello può influenzare l'accuratezza delle variabili, perché fenomeni su piccola scala potrebbero non essere rappresentati accuratamente in modelli a bassa risoluzione.

Sotto è raffigurata una tabella riassuntiva, che ben esplicita i risultati

Variabile	Dipendenza dalla parametrizzazione	Incertezza
Velocità del vento (U10, V10)	Elevata (turbolenza, interazione con il suolo)	Alta
Temperatura a 2 metri (T)	Moderata (scambio termico con il suolo)	Moderata
Umidità relativa (RH)	Elevata (evaporazione, condensazione)	Alta
Pressione s.l.m. e geopotenziale	Bassa (equazioni fisiche dirette)	Bassa
MRT (Mean Radiant Temperature)	Moderata (dipende da radiazione e riflessi)	Moderata
UTCI (Universal Thermal Climate Index)	Elevata (combinazione di variabili con alta incertezza)	Alta

Tabella 11.2: Differenti incertezze, nelle variabili estratte da ERA5

Capitolo 12

Raccolta e manipolazione dei dati

12.1 Raccolta dati

La raccolta dati dai dataset di ERA5 prevede, per ciascuna delle 7 variabili di nostro interesse quattro diverse acquisizioni:

- Acquisizione di tutte e 7 le variabili, per le 48 ore comprese tra il 27 e e il 28 Luglio del 1983
- Acquisizione di tutte e 7 le variabili, per le 48 ore comprese tra il 6 e e il 7 Luglio del 2015
- Acquisizione di tutte e 7 le variabili, ogni 6 ore (8 istanti complessivi) tra le 00:00 del 27 e le 18:00 del 28 Luglio di ogni anno compreso tra il 1991 e il 2020 [(WMO), 2021]. Questo è utile per avere un campione consistente de valori medi del periodo, mentre il riferimento temporale maggiormente discretizzato è utile per ridurre la complessità computazionale.
- Acquisizione di tutte e 6 le variabili, ogni 6 ore (8 istanti complessivi) tra le 00:00 del 6 e le 18:00 del 7 Luglio di ogni anno compreso tra il 1991 e il 2020 [(WMO), 2021]. Questo è utile per avere un campione consistente de valori medi del periodo, mentre il riferimento temporale maggiormente discretizzato è utile per ridurre la complessità computazionale.

Tutti i dati sono raccolti attorno a una precisa aria geografica, delimitata in longitudine e latitudine, i cui confini sono 75°N come limite settentrionale, 60°E come limite orientale, -40°W come limite occidentale, e 28°S come limite meridionale. Sotto è raffigurata un'immagine esplicativa.

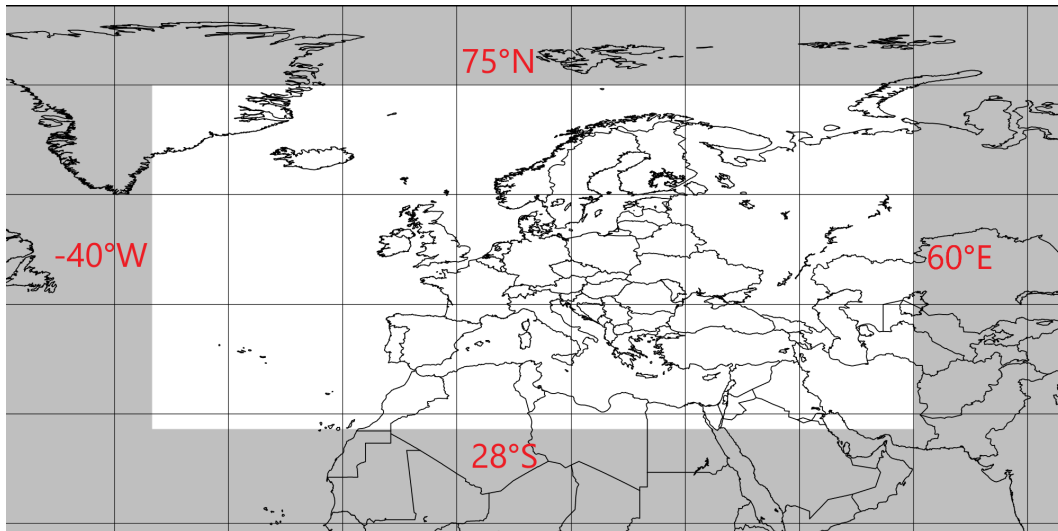


Figura 12.1: *La zona geografica su cui sono state raccolte le variabili, corrispondente a grandi linee a "un'Europa allargata".*

12.2 Manipolazione Dati

La manipolazione dei dati al fine di una corretta e rappresentativa analisi, è stata ottenuta tramite l'ausilio di Python, da cui è stato possibile ottenere la misura del vento complessiva, e non solo in componenti zonale e meridionale. Ed è stato anche largamente utilizzato il software CDO (climate Data Operators), per operazioni banali e non con file NetCDF, tra cui il calcolo della media su un certo intervallo temporale, sottrazione di dati e la generica manipolazione di file climatici. Si veda il seguente link per ulteriori dettagli riguardo CDO [<https://code.mpimet.mpg.de/projects/cdo>].

Capitolo 13

Analisi Meteorologica e Climatologica per il 27-28 Luglio 1983

Gli eventi meteorologici eccezionali, avvenuti il 27-28 Luglio 1983, sono comprensibili solo con uno studio approfondito di diverse variabili meteorologiche in tutta Europa. Tali variabili sono ottenute da diverse rianalisi dei dataset di ERA5.

13.1 Circolazione Generale dell'Atmosfera

Per iniziare a individuare, quali possono essere state le cause dell'evento estremo, si osserva la circolazione generale dell'atmosfera, ovvero:

- la pressione atmosferica a livello del mare, per comprendere e mappare la situazione dei cicloni e degli anticicloni e i gradienti della pressione.
- le altezze di geopotenziale, per osservare la struttura della troposfera durante l'evento, nel nostro caso a circa 1500 metri (850 hPa).

La pressione a livello del mare mostra le strutture cicloniche e anticicloniche presenti nella bassa troposfera. Si nota chiaramente un importante anticiclone nell'Atlantico Settentrionale, con valori di pressione superiori a 1040 hPa, estremamente alti. Inoltre si osserva una minore struttura anticiclonica sopra la penisola italiana, con valori più limitati (1020-1030 hPa), ma comunque importanti, per una regione climatica come il mediterraneo, dove sono inusuali estremi di pressione, vedi Figura 13.1. Il geopotenziale indica a quale "quota" si può trovare un certo valore di pressione, in questo caso 850 hPa. Ma come si può ricavare la quota rispetto ai dati della Figura 13.2? Per comprenderlo,

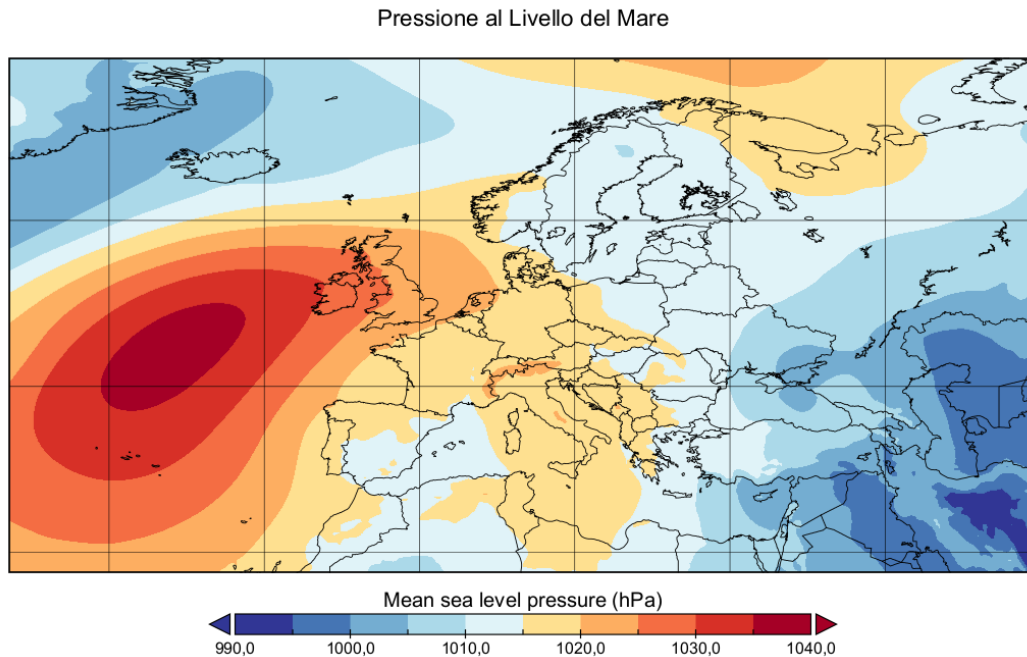


Figura 13.1: *Pressione al livello del mare media in Europa per i giorni 27 e 28 Luglio 1983.*

si deve prima definire cos'è il geopotenziale, ovvero l'energia potenziale di una massa unitaria di aria, considerando lo 0 al livello del mare. La formula dell' Energia Potenziale:

$$U = mgh \quad (13.1)$$

data una massa unitaria diventa semplicemente:

$$U = gh \quad (13.2)$$

Perciò semplicemente dividendo il geopotenziale per la costante di gravità ≈ 10 , si ottiene la quota. Quindi dalla mappa si può notare come anche a quote più elevate della troposfera, si mantengono le stesse strutture di alta e bassa pressione che si trovano al livello del mare. In particolare si osservano due arie di alta pressione in corrispondenza del Nord Atlantico e sopra la penisola italiana, dove risulta più accentuata la struttura anticiclonica rispetto alla sua rappresentazione a livello del mare.

Geopotenziale a 850 hPa

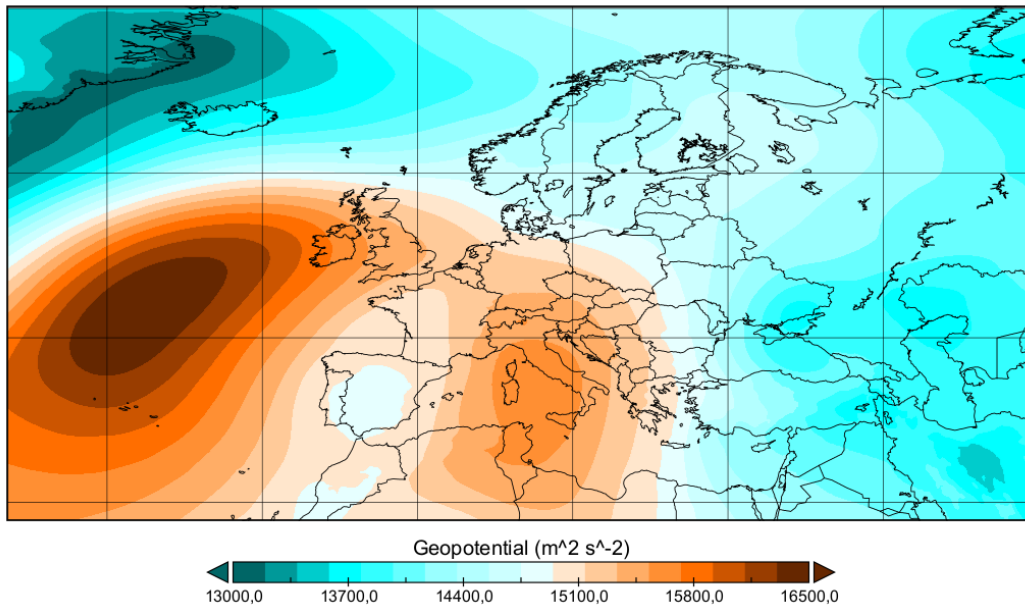


Figura 13.2: *Geopotenziale medio in Europa per i giorni 27 e 28 Luglio 1983.*

Osservando il geopotenziale rispetto alle medie climatiche (vedi Figura 13.2) in Italia, la regione geografica di interesse, si nota una moderata anomalia positiva, (alta pressione), mentre si osserva una anomalia estrema nel Nord Atlantico, sempre in direzione di un' alta pressione.

Differenza tra Geopotenziale medio del 27-28 Luglio 1983 e la media 1991-2020 per lo stesso periodo

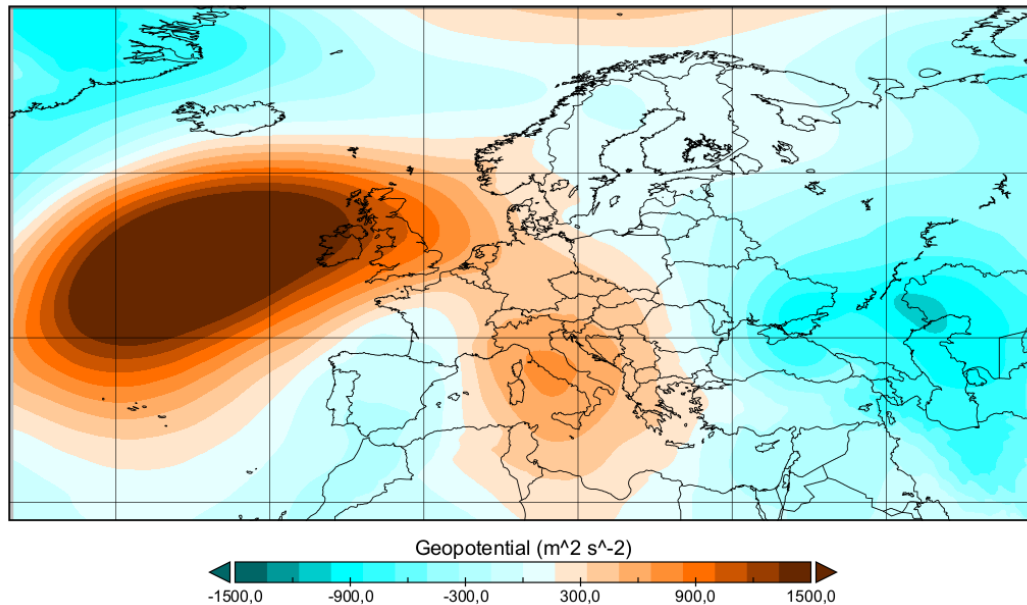


Figura 13.3: *Differenza tra geopotenziale medio del 27-28 Luglio 1983 e media trentennale.*

13.2 Variabili in quota

Si valutano ora quelle variabili meteorologiche che non definiscono la circolazione generale dell'atmosfera, ma i cui valori sono ricavati in quota, in questo studio consideriamo la sola umidità relativa (RH), calcolata al livello di pressione di 850 hPa, (≈ 1500 metri).

Dalla Figura 13.4 si nota come i valori dell'umidità relativa nella penisola italiana siano molto bassi, tra il 10% e il 40% circa. Mediamente però l'umidità relativa in estate è più bassa rispetto all'inverno, non è che tali valori sono nella norma? É allora confrontare i valori medi dei due giorni, con la media trentennale, 1991-2020.

Umidità Relativa

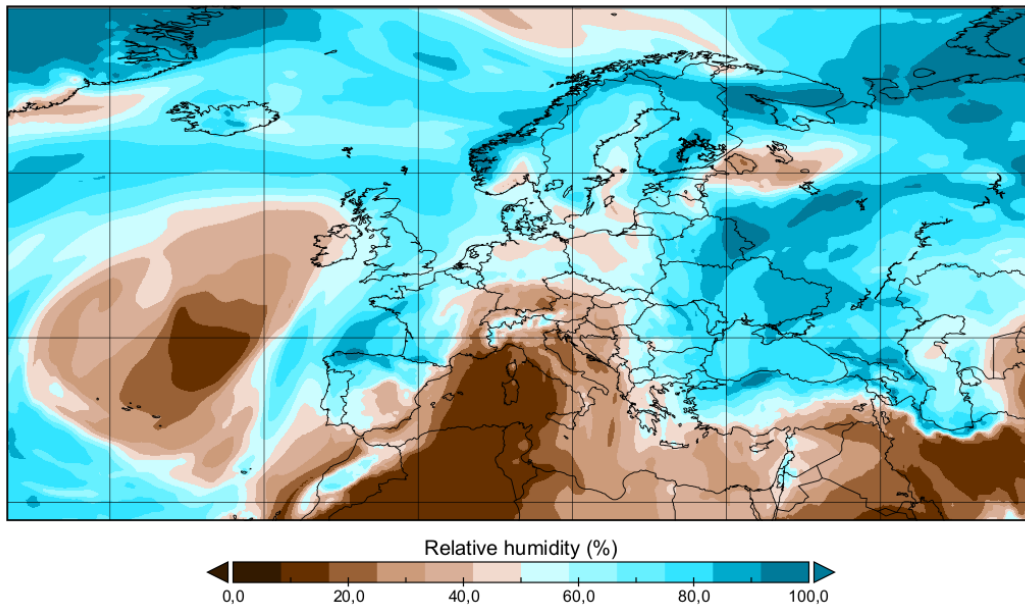


Figura 13.4: *Umidità relativa media in Europa per i giorni 27 e 28 Luglio 1983.*

Anche rispetto alla media trentennale, i valori di umidità relativa in Italia e in particolare nelle regioni centro-settentrionali sono bassi, con una discrepanza di circa il 20%, 30% rispetto alle medie del periodo vedi Figura 13.5.

Umidità Relativa rispetto a valori di riferimento del 1991-2020

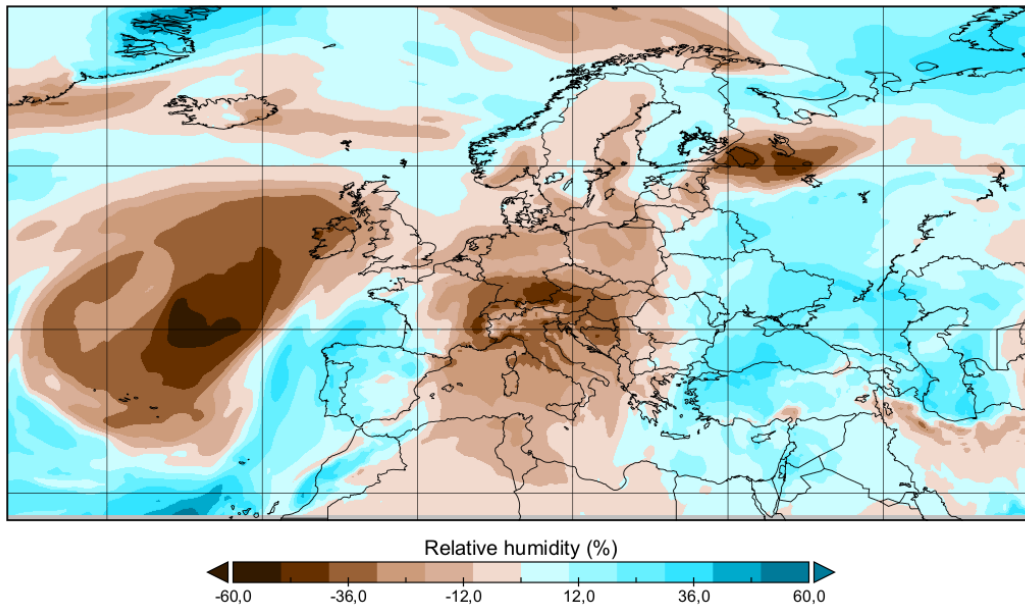


Figura 13.5: *Variazione dell'umidità relativa media in Europa per i giorni 27 e 28 Luglio 1983 rispetto alla media 1991-2020 per lo stesso periodo dell'anno.*

13.3 Variabili al suolo

Le variabili meteorologiche al suolo, sono valutate in prossimità della superficie terrestre, spesso da centraline meteo dislocate nel territorio. In questo studio si osservano

- La temperatura calcolata a 2 metri dalla superficie.
- Il vento a 10 metri di altezza.

La temperatura dell'aria massima in Italia, e in particolare nella zona dell' Emilia Romagna, è di circa 33°C-35°C, vedi Figura 13.6, tale temperatura è stata calcolata nell'intervallo orario più caldo delle 48 ore tra il 27 e il 28 Luglio 1983.

Temperatura a 2 Metri dal Suolo alle 15:00 [CET] del 27 Luglio 1983

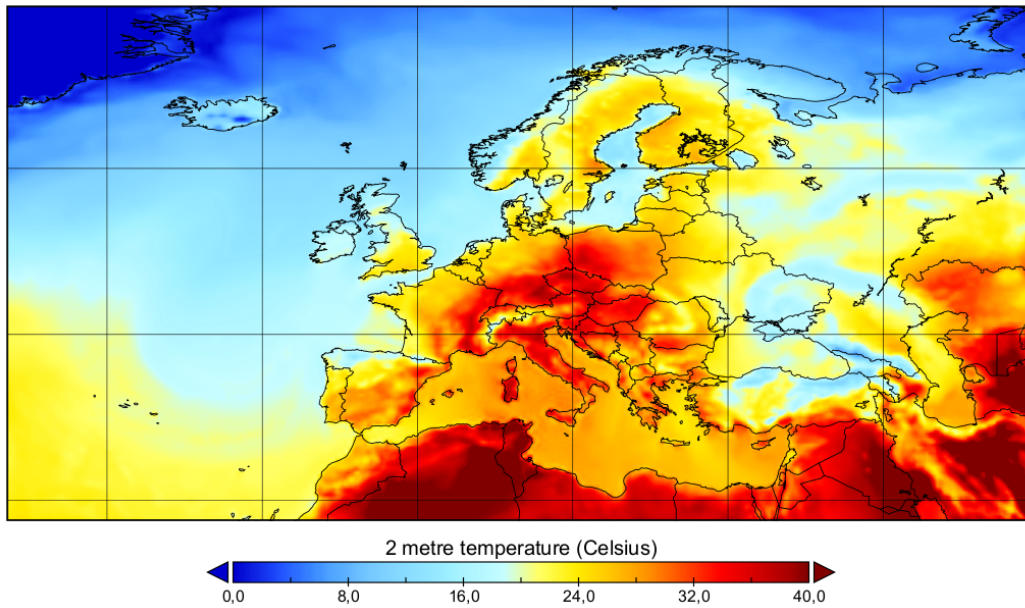


Figura 13.6: *Temperatura dell'aria a 2 metri dal suolo, alle 15:00 del 27 Luglio 1983.*

Per comprendere se tale temperatura sia o meno eccezionale, è utile confrontarla con un valore medio per il periodo. Quello che si osserva dalla Figura 13.7, è una variazione significativa, di circa 3°C-4°C rispetto ai valori medi. Una temperatura quindi alta, ma non estrema. Situazione ben diversa invece si può osservare oltralpe, dove la differenza rispetto ai valori medi raggiunge quasi i 10°C.

Differenza tra la Temperatura Media del 27-28 Luglio 1983 e la Media 1991-2020

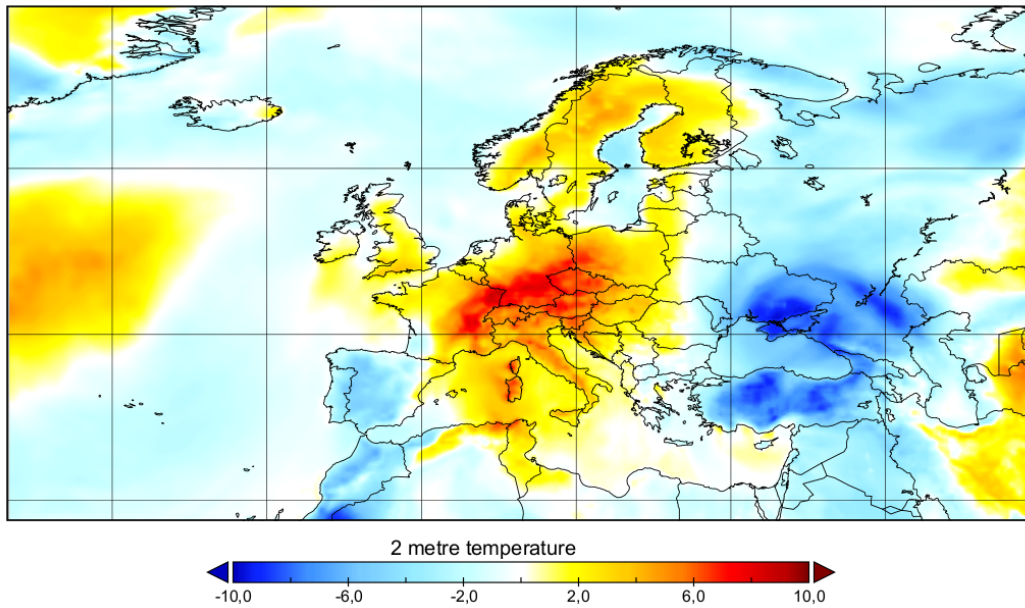


Figura 13.7: *Differenza tra la temperatura dell'aria a 2 metri dal suolo, considerata nell'ora più calda tra il 27-28 Luglio 1983 e la media trentennale 1991-2020 per lo stesso giorno.*

Si osserva in Figura 13.8, come nelle giornate del 27-28 Luglio 1983, i valori medi della velocità del vento siano stati estremamente bassi in tutta Europa, ma specialmente sopra la penisola italiana, dove in nessuna regione si possono trovare velocità superiori a 3 m/s , $\approx 10 \text{ Km/h}$. Sorge qui una domanda: forse nell'estate mediterranea, dominata da strutture anticicloniche, è nella norma avere velocità del vento molto basse.

Velocità del Vento a 10 metri dal suolo

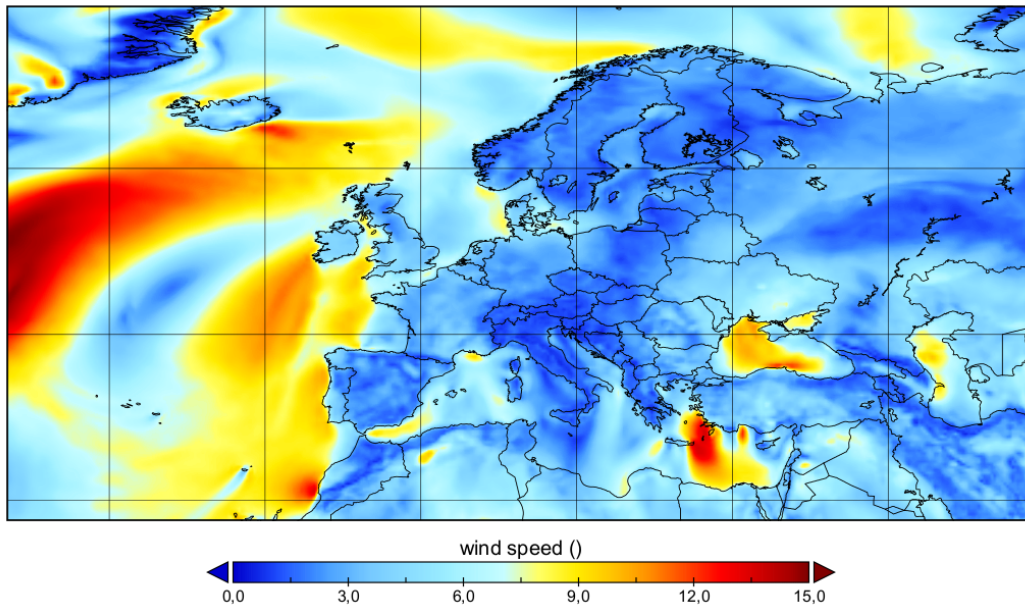


Figura 13.8: *Velocità del vento media il 27-28 Luglio 1983.*

Dalla Figura 13.9, si intuisce come le differenze tra la velocità del vento delle giornate di riferimento e i valori medi, in Italia siano piccole, ma significative. Circa 2 m/s ovvero $\approx 7Km/h$. Da cui si può concludere che, nonostante i valori medi estivi siano effettivamente bassi, si assiste a un periodo di eccezionale calma.

Velocità del vento rispetto alla media 1991-2020 per lo stesso periodo

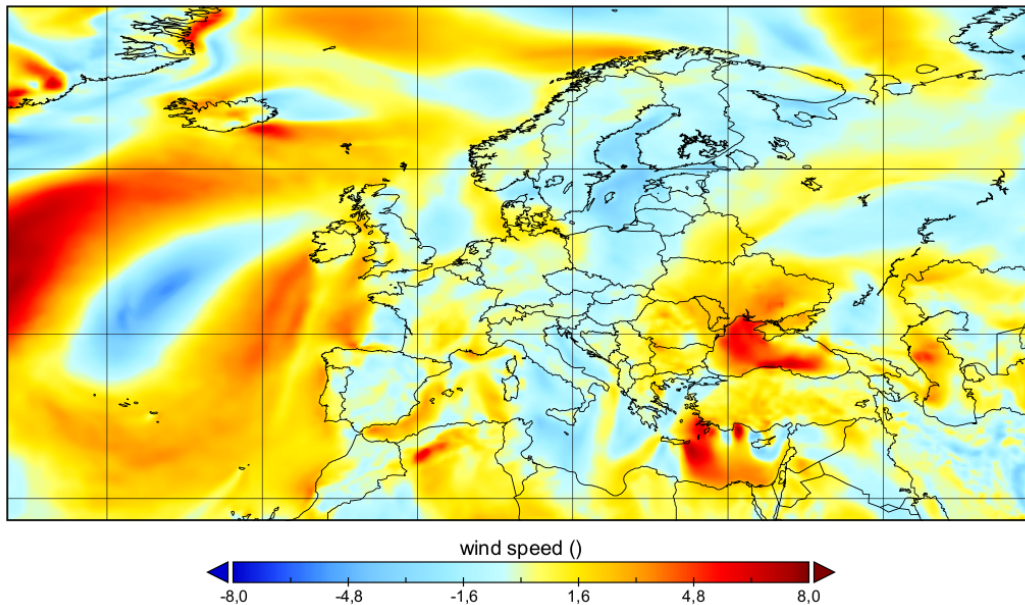


Figura 13.9: *Differenza tra la velocità del vento media il 27-28 Luglio 1983 e la media trentennale 1991-2020*

13.4 Variabili per lo Stress Termico

Si analizzano ora le variabili da stress termico, ovvero l'MRT e l'UTCI, tali parametri sono misurati a livello del suolo, dove hanno un effettiva influenza sulle attività umane, ma non sono misurate direttamente, in quanto come visto dal Paragrafo 8, dipendono da altre variabili.

- L'MRT mostra la radiazione solare e termica diretta e indiretta, può essere interpretato in maniera simile all'Albedo, ovvero indica la presenza o meno di copertura nuvolosa, che ostacola la radiazione solare. Ma non solo, infatti anche in caso di presenza nuvolosa, se i giorni precedenti il terreno si è riscaldato molto, ci sarà molta radiazione termica, e quindi un valore dell'MRT alto. Risulta un indice molto completo.
- L'UTCI è l'indice più accurato per lo stress termico, ottenuto considerando tutti i più influenti fattori ambientali. E' quindi il suo valore a determinare l'effetto dell'ondata di calore sulla popolazione.

E' difficile intuire il livello dell'MRT, osservandone i suoi valori. Non è un dato che si valuta abitualmente, ed è perciò estremamente complesso capire cosa significa un MRT

MRT medio per il 27-28 Luglio 1983

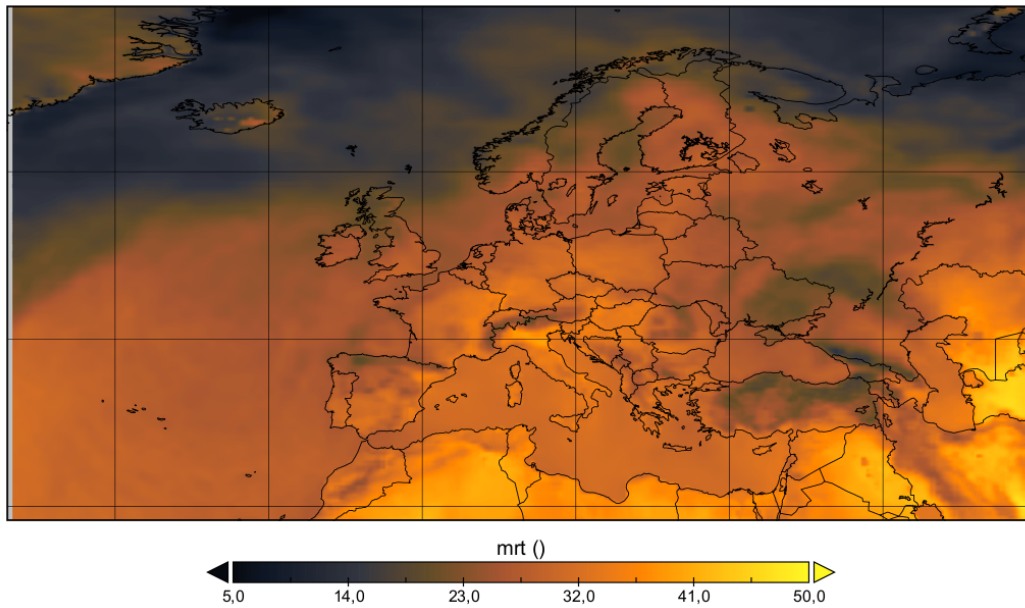


Figura 13.10: *Valori dell'MRT in °C*

di 30°C. Una soluzione per una maggiore comprensione può essere il confronto, con altre aree geografiche. Dalla Figura 13.10 l'MRT nella pianura padana, si avvicina molto a quello di molte aree desertiche tropicali, quali il Sahara ($\approx 40^\circ\text{C}$ nel nord Italia, $\approx 45^\circ\text{C}$ nel Sahara). Si intuisce perciò un irraggiamento solare estremamente alto nella zona dell'Emilia Romagna.

Differenza tra l'MRT medio del 27-28 Luglio e i valori medi 1991-2020

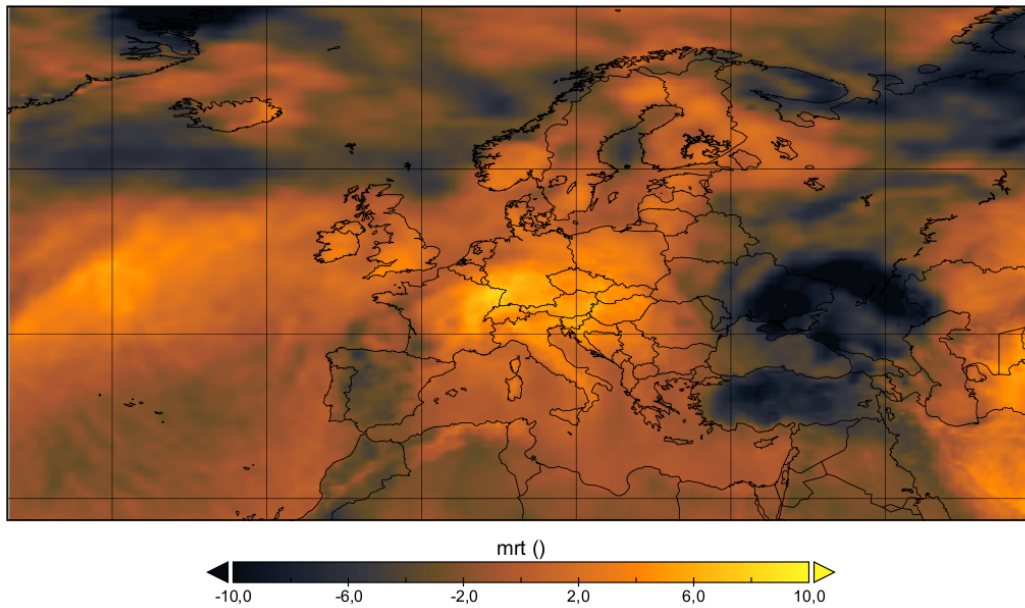


Figura 13.11: *Differenza tra i valori di MRT medi per il 27-28 Lugli 1983, e i valori medi del periodo 1991-2020*

Osservando la differenza rispetto alla media trentennale, si conferma l'MRT estremamente alto, vedi Figura 13.11, con le discrepanze maggiori in Europa che si verificano nella regione alpina, e nelle aree limitrofe, compresa la regione padana.

Valore dell'UTCI registrato alle 15:00 [CET] del 27 Luglio 1983

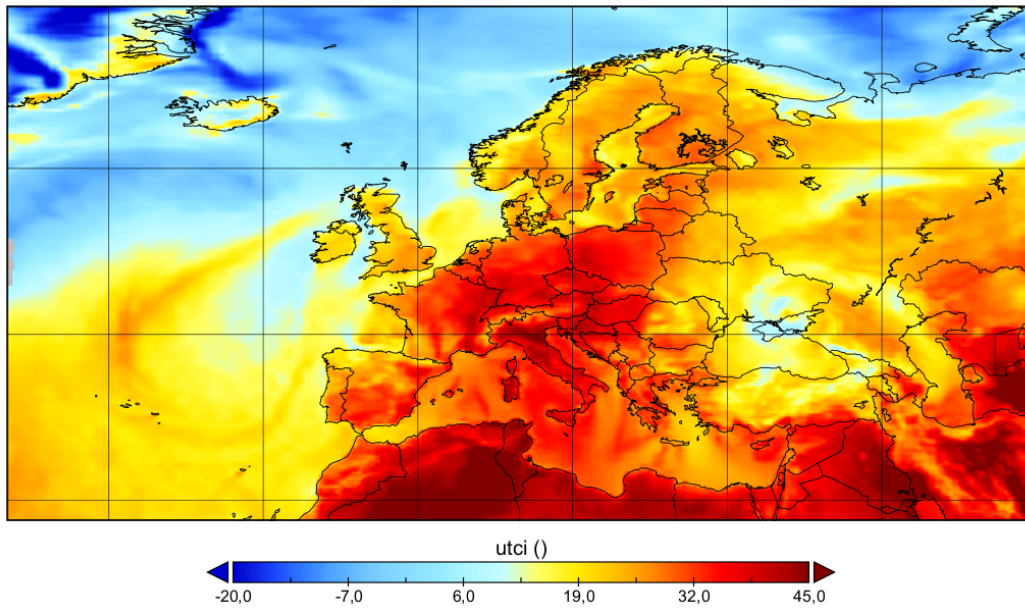


Figura 13.12: *Valore massimo dell'UTCI, registrato nelle 48 ore tra il 27 e il 28 Luglio 1983*

Si è scelto in Figura 13.12, di mostrare non l'UTCI medio giornaliero, ma il massimo, in quanto lo stress termico in estate, si verifica principalmente nelle ore più calde della giornata. Nella Pianura Padana si osservano valori di UTCI eccezionali, tra i 40°C e 45°C che corrispondono, vedi Paragrafo 8, a uno stress termico molto forte a tratti estremo nella scala dell'UTCI. Sono valori simili, guardando la Figura 29, a quelli dell'Algeria interna o dell'Iraq, luoghi con un clima completamente diverso, e famosi per i record di temperatura.

Differenza tra i valori medi di UTCI il 27-28 Luglio 1983 e i valori di riferimento 1991-2020

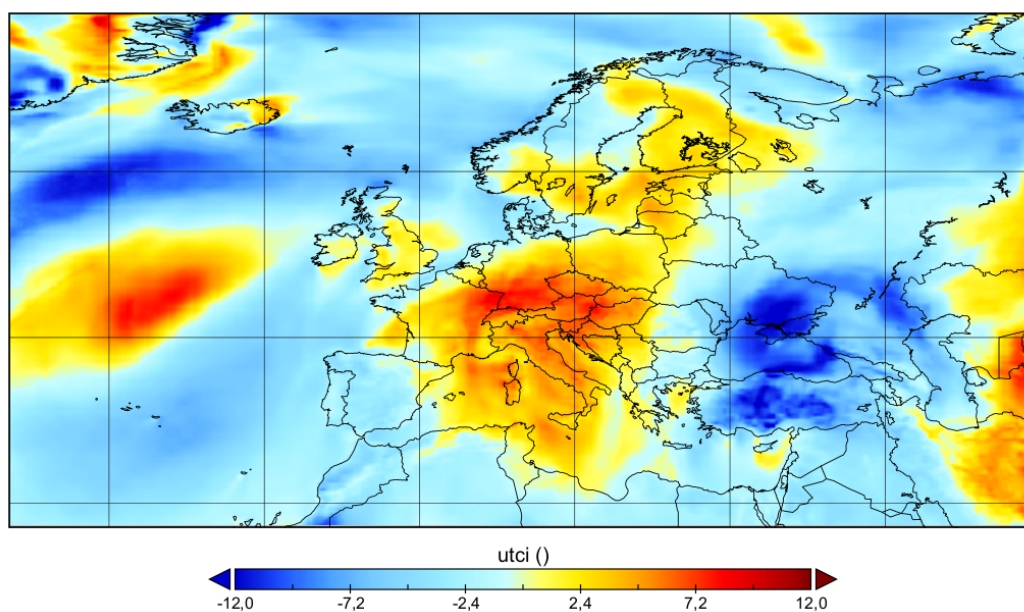


Figura 13.13: *Differenza tra il valore medio di UTCI per il 27-28 Luglio 1983, e i valori di riferimento del periodo 1991-2020*

Tali valori di UTCI sono nella norma, durante le estati in Pianura Padana? Dalla Figura 13.13, si osserva come nel nord Italia e specialmente in Emilia Romagna, sono valori di UTCI, superiori di circa 7°C-8°C rispetto alla media, quindi una variazione estremamente significativa.

Capitolo 14

Analisi Meteorologica e Climatologica per il 6-7 Luglio 2015

Seguendo considerazioni analoghe al paragrafo 14 sulle variabili meteorologiche, si illustrano e si commentano i loro andamenti in Europa e specialmente nel Nord Italia, per le 48 ore nelle quali si è verificato l'evento estremo.

14.1 Circolazione Generale dell'Atmosfera

Dalla Figura 14.1, si osservano le masse cicloniche e anticicloniche in Europa per i due giorni analizzati. Tralasciando strutture di pressione troppo distanti dalla regione di nostro interesse, si notano due massimi di alta pressione. Il primo meno marcato, con i valori massimi corrispondenti alla regione alpina, il secondo invece nel medio-Atlantico, con il massimo localizzato vicino alle Azzorre.

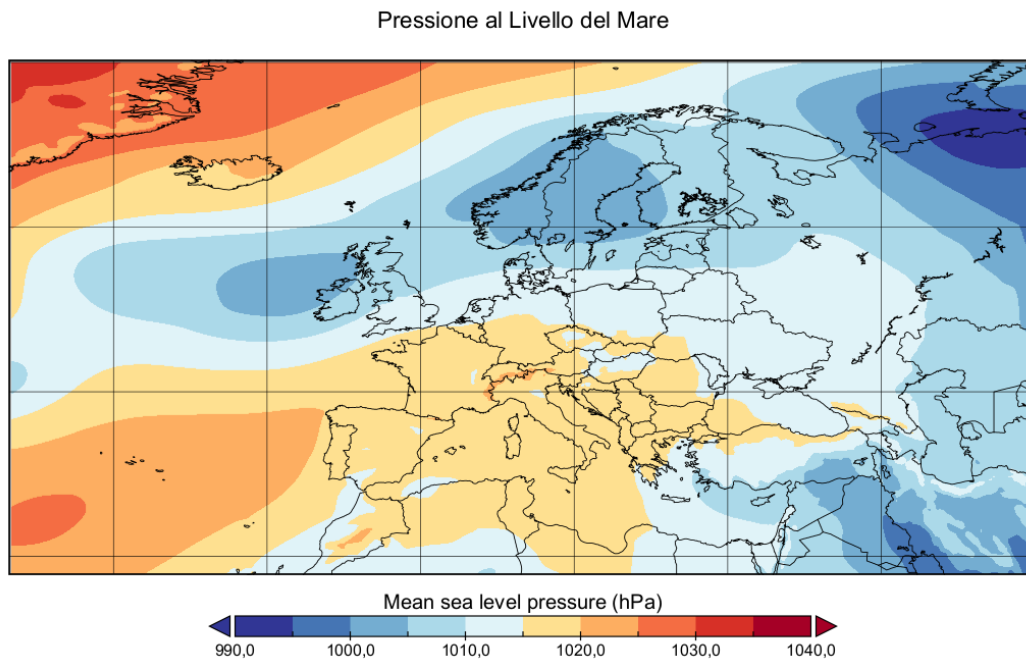


Figura 14.1: *Pressione al livello del mare media in Europa per i giorni 6 e 7 Luglio 2015*

La Figura 14.2, aiuta meglio a identificare le masse anticicloniche, grazie allo studio in quota $\approx 1500m$. Si osservano comunque i due massimi indicati precedentemente, ma il massimo di alta pressione che sembrava localizzato nella regione alpina, ora appare sopra le Baleari, nel Mediterraneo Occidentale.

Geopotenziale a 850 hPa

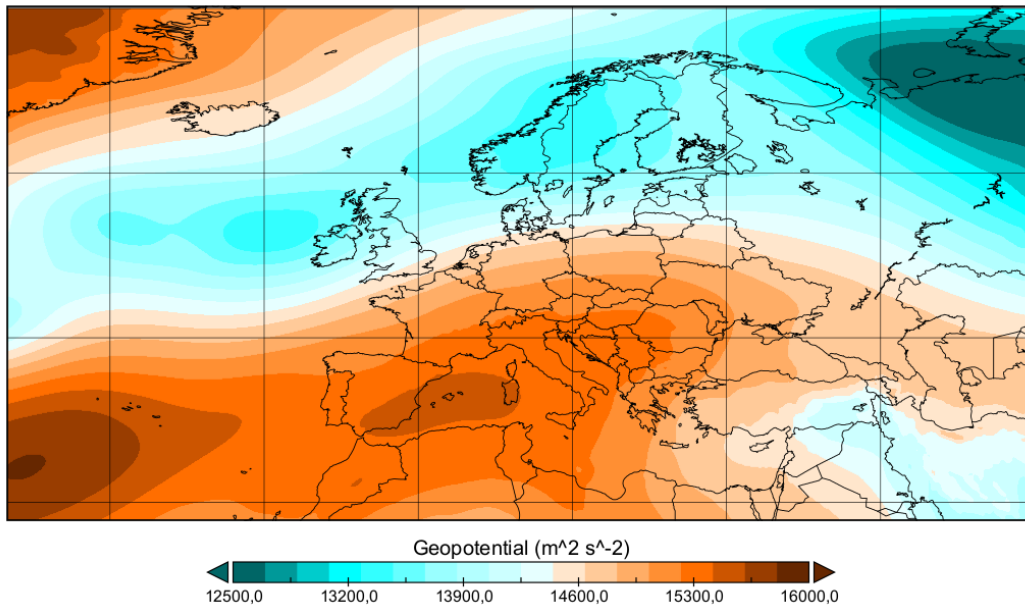


Figura 14.2: *Geopotenziale medio in Europa per il 6-7 Luglio 2015*

E' lecito ora chiedersi se tali strutture anticicloniche sono nella norma, per l'estate mediterranea. Dalla Figura 14.3 si osserva che mentre l'alta pressione delle Azzorre, non risulta anomala, ciò non si può dire per il picco di alta pressione meno marcato nel Mediterraneo, che risulta anomalo per le medie del periodo.

Differenza tra Geopotenziale medio del 6-7 Luglio 2015 e media 1991-2020 per lo stesso periodo

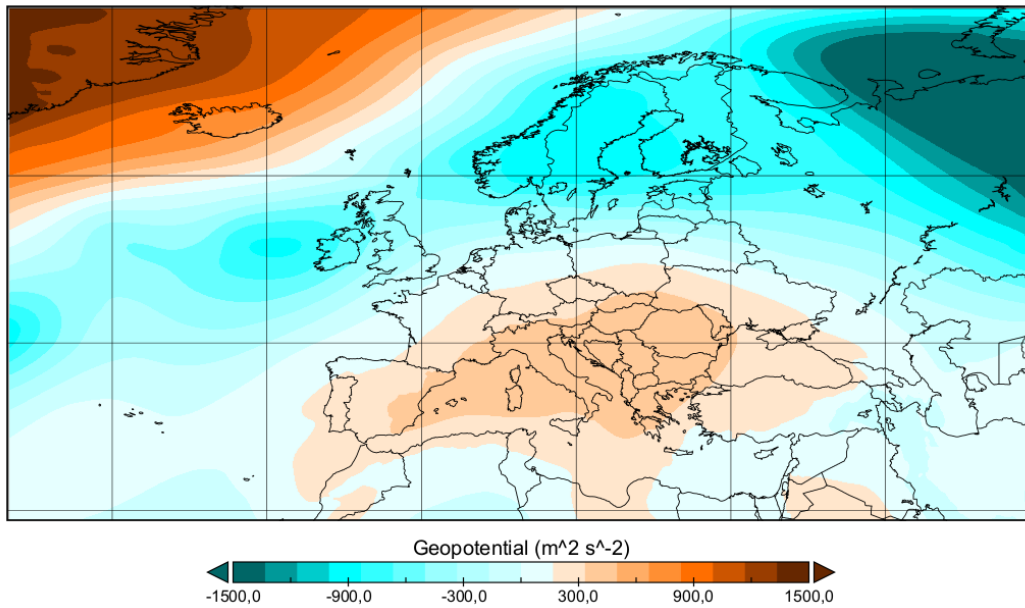


Figura 14.3: *Differenza tra geopotenziale medio del 27-28 Luglio 1983 e media trentennale.*

14.2 Variabili in Quota

L'Umidità relativa media nel nord Italia, per le giornate di interesse è elevata, circa 70%-80% ,vedi Figura 14.4. Considerando inoltre che mediamente d'estate l'RH è più bassa della media annuale, tali valori sono anomali.

Umidità Relativa

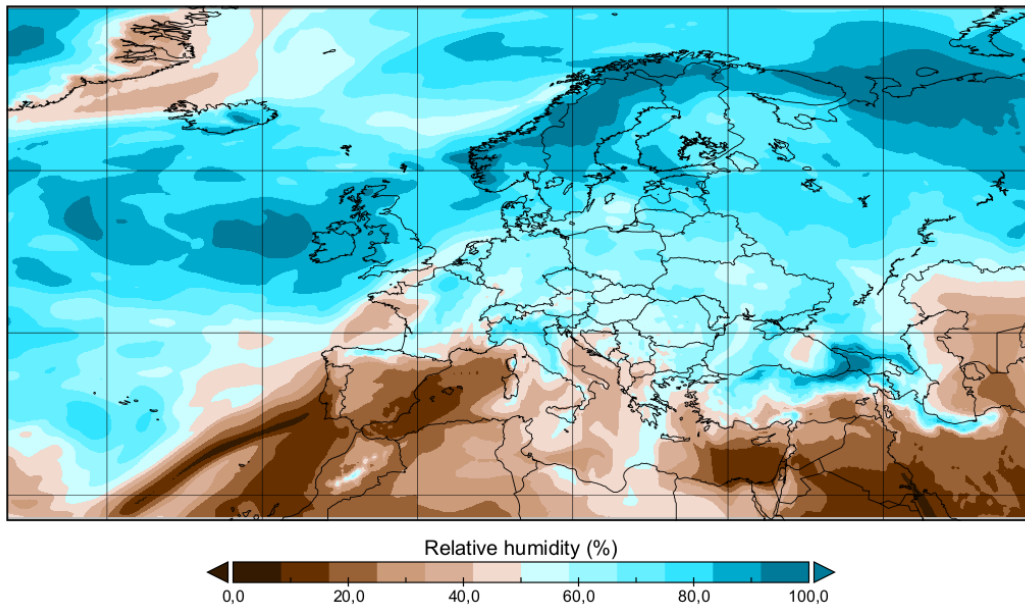


Figura 14.4: *Umidità relativa media in Europa per il 6-7 Luglio 2015*

Si confrontano ora i valori caratteristici dei due gironi, con le medie stagionali del 1991-2020. Ciò conferma che nel nord Italia si sono verificate delle discrepanze significative, ma non estreme, con l'RH maggiore di circa il 25% rispetto ai valori consueti, vedi Figura 14.5.

Umidità Relativa rispetto a valori di riferimento del 1991-2020

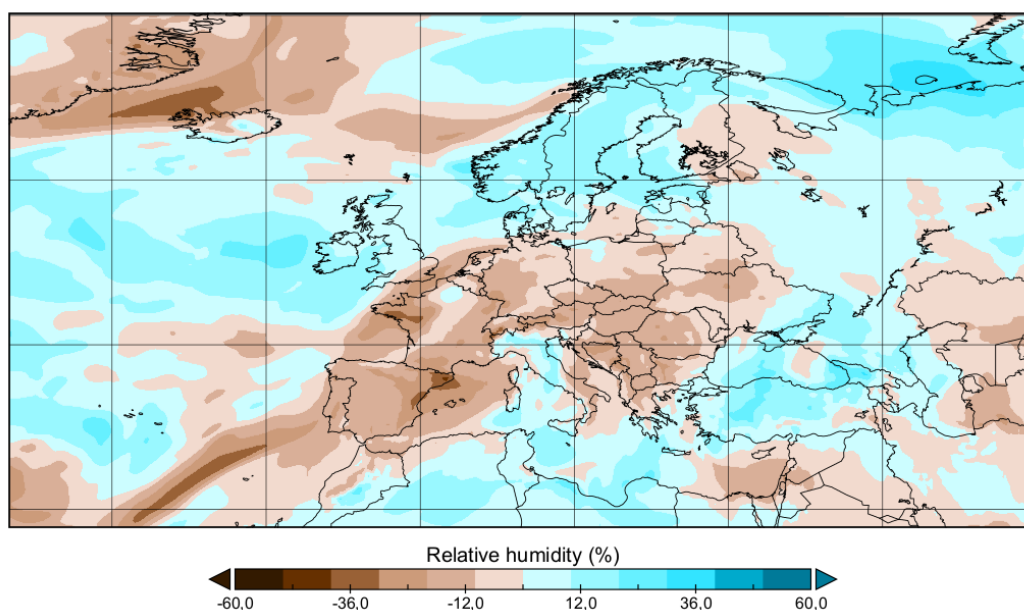


Figura 14.5: *Differenza tra umidità relativa media del 6-7 Luglio 2015 e media trentennale.*

14.3 Variabili al Suolo

Si osserva dalla Figura 14.6, come nell'ora più calda, tra il 6-7 Luglio 2015, la temperatura massima nel Nord Italia, sia di circa 35°C-36°C, valori alti, ma non estremi, non sufficienti per la diramazione dello stato d'emergenza da parte degli enti locali. Rimanendo invece nel contesto Europeo, in Spagna si assiste a valori di temperatura estremi, [$>40^{\circ}\text{C}$].

Temperatura a 2 Metri dal Suolo alle 15:00 [CET] del 6 Luglio 2015

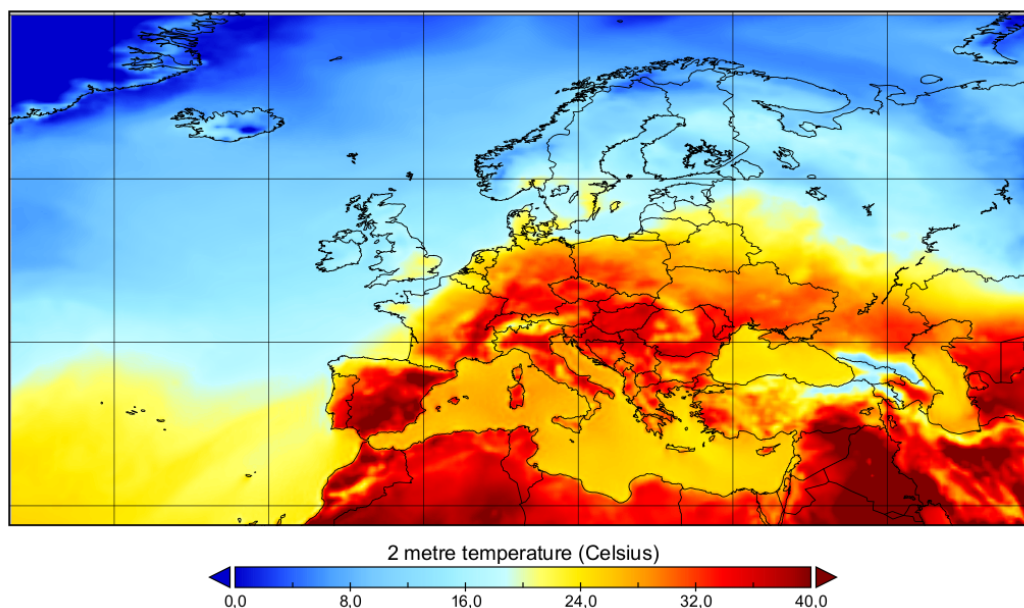


Figura 14.6: *Temperatura dell'aria a 2 metri dal suolo, alle 15:00 del 6 Luglio 2015.*

La conferma che tali valori, di temperatura non sono estremi per il periodo, lo si può vedere dalla Figura 14.7. Dove si confrontano i valori medi per il periodo, con i valori medi registrati nei due giorni di interesse. Nel Nord Italia, la temperatura è di circa 4°C maggiore delle medie stagionali, una variazione significativa, ma non estrema. Ciò non si può dire per la regione d'Oltralpe e la Penisola Iberica, dove le discrepanze arrivano a 6°C-8°C.

Differenza tra la Temperatura Media del 6-7 Luglio 2015 e la Media 1991-2020

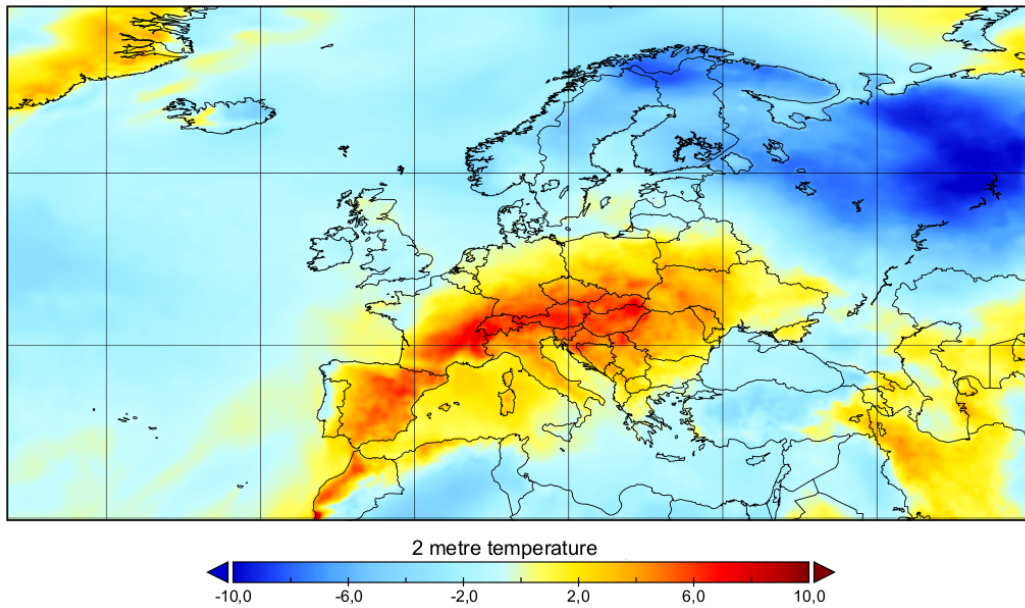


Figura 14.7: *Differenza tra la temperatura dell'aria a 2 metri dal suolo, considerata nell'ora più calda tra il 6-7 Luglio 2015 e la media trentennale 1991-2020 per lo stesso giorno.*

Si osserva in figura 14.8, come nelle giornate del 6-7 Luglio 2015, i valori medi della velocità del vento siano stati estremamente bassi in tutta Europa, ma specialmente sopra la penisola italiana, dove in nessuna regione si possono trovare velocità superiori a 3 m/s, 10Km/h, e nel Nord Italia in particolare, si assiste a velocità ancora inferiori.

Velocità del Vento a 10 metri dal suolo

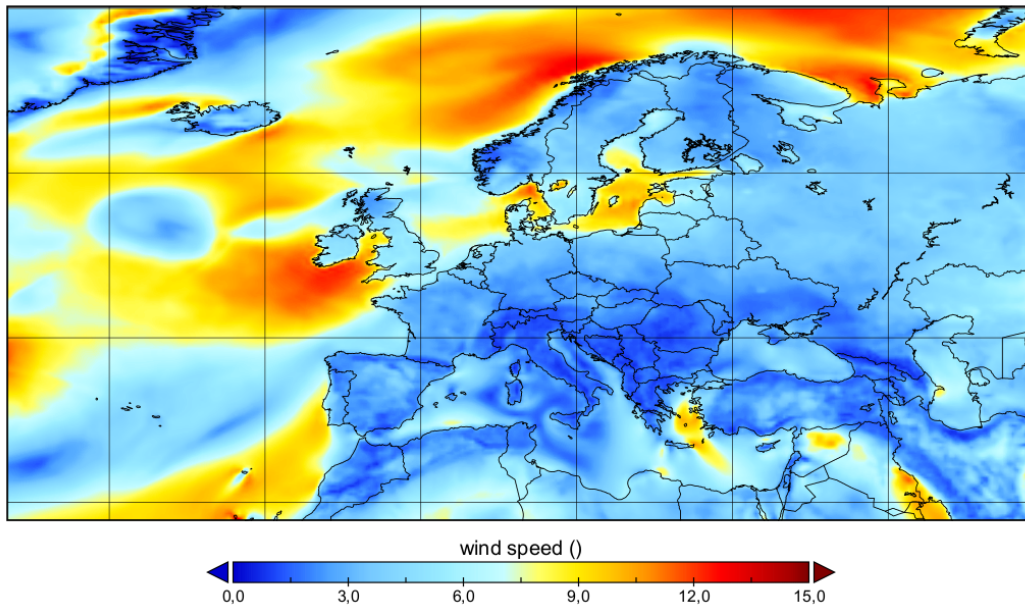


Figura 14.8: *Velocità del vento media il 6-7 Luglio 2015.*

Dalla Figura 14.9, si intuisce come le differenze tra la velocità del vento delle giornate di riferimento e i valori medi, in Italia, siano piccole. circa 1 m/s ovvero 4Km/h. Da cui si può concludere che, nonostante i valori medi estivi siano effettivamente bassi, si assiste a un periodo di particolare calma.

Velocità del vento rispetto alla media 1991-2020 per lo stesso periodo

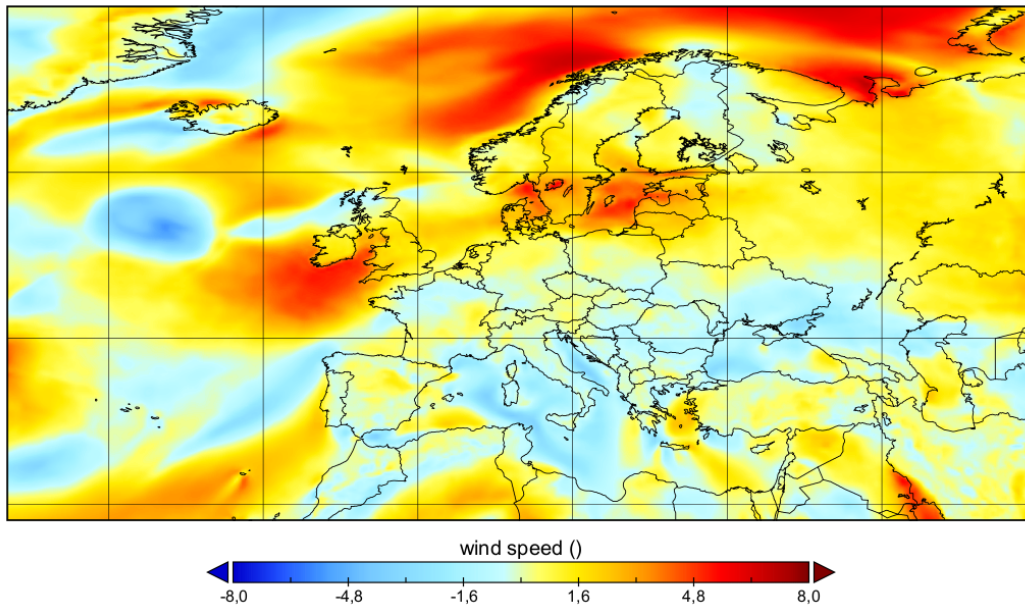


Figura 14.9: *Differenza tra la velocità del vento media il 6-7 Luglio 2015 e la media trentennale 1991-2020.*

14.4 Variabili per lo Stress Termico

Per comprendere il livello dell' MRT, nella regione di interesse è utile il confronto con altre aree geografiche, vista la difficile interpretazione del dato singolo. L'MRT nella pianura padana, si avvicina molto a quello di molte aree desertiche come il Sahara oppure la Spagna Meridionale (circa 40°C nel nord Italia, circa 40°C in Spagna, circa 45°C nel Sahara). L'irraggiamento solare è quindi molto alto ne Nord Italia, e in particolare nella zona della Romagna, dove si superano i 40°C - 41°C, come si osserva dalla Figura 14.10.

MRT medio per il 6-7 Luglio 2015

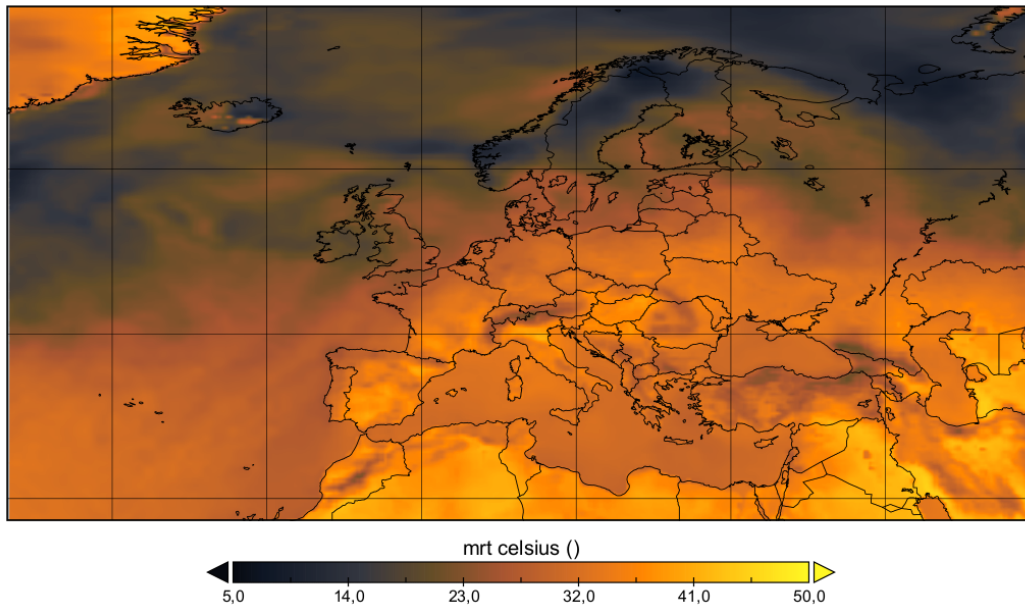


Figura 14.10: *Valori dell'MRT in °C.*

Osservando la differenza rispetto alla media trentennale, si conferma l'MRT alto, ma non altissimo, circa 6°C maggiore della media, mentre le discrepanze maggiori si trovano altrove in Europa, in particolare nelle pianure ungheresi, con valori sopra i 10°C, rispetto alla norma, vedi Figura 14.11.

Differenza tra l'MRT medio il 6-7 Luglio 2015 e i valori medi 1991-2020

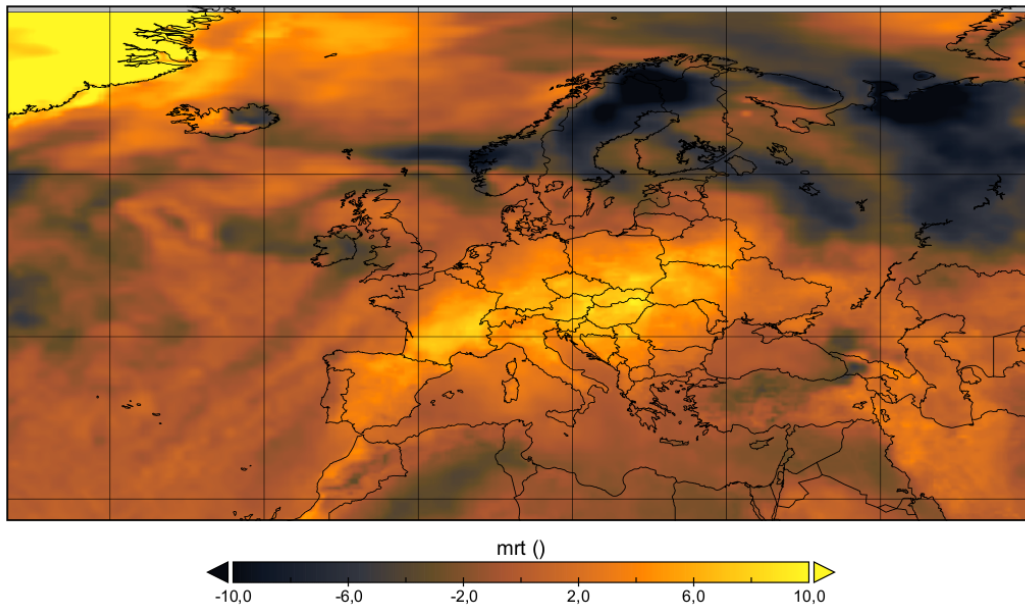


Figura 14.11: *Differenza tra i valori di MRT medi per il 6-7 Luglio 2015, e i valori medi del periodo 1991-2020*

Si è scelto qui di mostrare non l'UTCI medio giornaliero, ma il massimo, in quanto lo stress termico in estate, si verifica principalmente nelle ore più calde della giornata. Nella pianura padana si osservano valori di UTCI molto alti, circa 40°C, che corrispondono, vedi Paragrafo 8, a uno stress termico molto forte nella scala dell'UTCI. Sono valori che in Europa, la Figura 14.12 lo mostra, sono superati solo dalla Spagna Meridionale, regione caratterizzata mediamente da climi molto più caldi rispetto al Nord Italia.

Valore dell'UTCI registrato alle 15:00 [CET] del 6 Luglio 2015

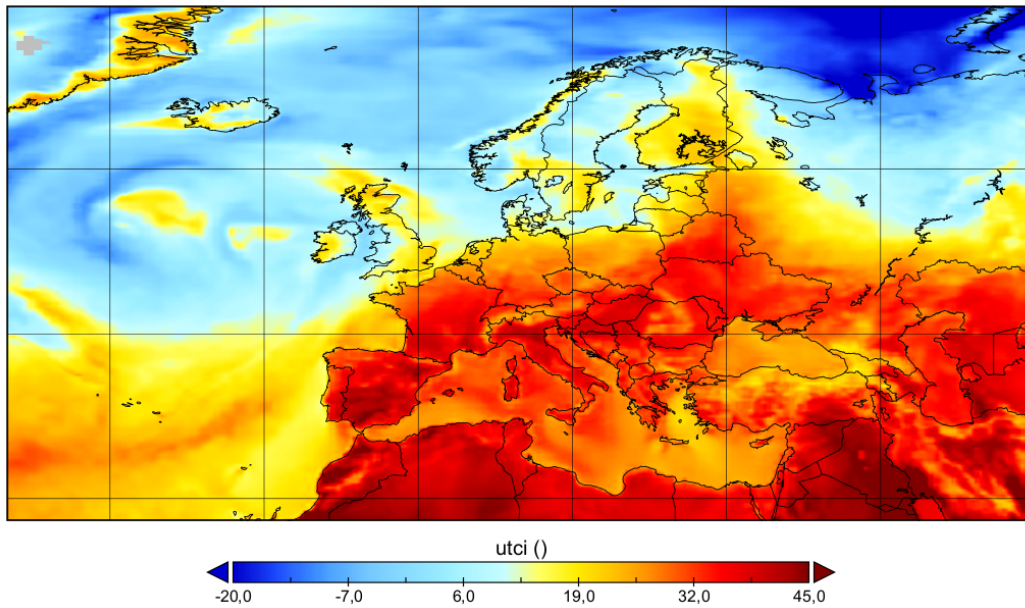


Figura 14.12: *Valore massimo dell'UTCI, registrato nelle 48 ore tra il 6 e il 7 Luglio 2015.*

Sono valori consueti di UTCI durante le estati in Pianura Padana e in particolare in Emilia Romagna? Dalla Figura 14.13, si osserva come nel nord Italia e specialmente in Emilia Romagna, sono valori di UTCI, superiori di circa 6°C - 7°C rispetto alla media, quindi una variazione molto significativa. Nonostante ciò in alcune aeree dell'Europa Centrale, la variazione con l'UTCI medio per il periodo risulta essere maggiore, fino a 10°C , anche se questo non significa obbligatoriamente un pericolo per la salute, come accade in Italia, visto che sono regioni geografiche mediamente più fredde.

Differenza tra i valori medi di UTCI il 6-7 Luglio 2015 e i valori di riferimento 1991-2020

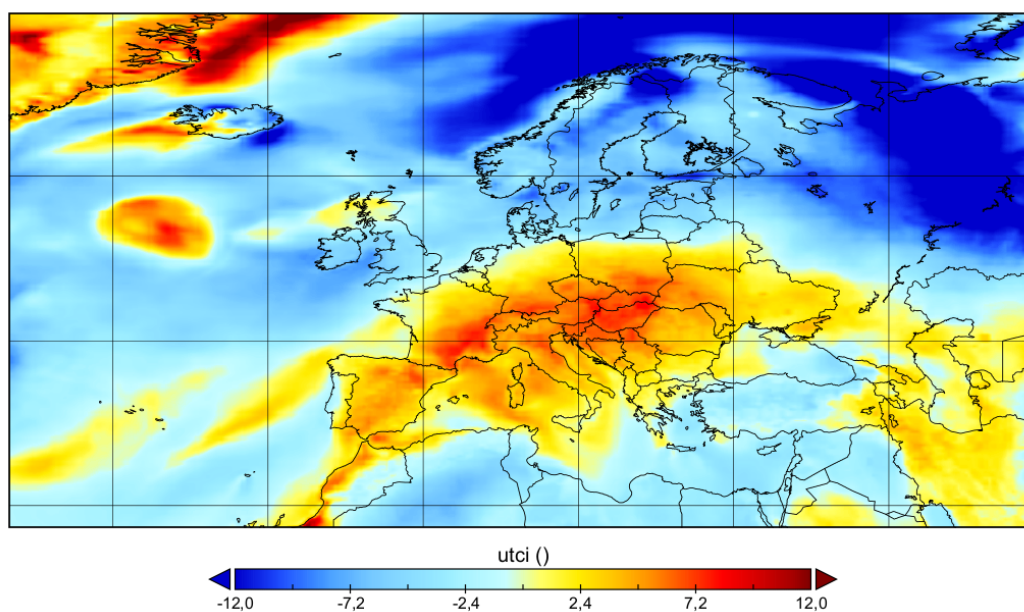


Figura 14.13: *Differenza tra il valore medio di UTCI per il 6-7 Luglio 2015, e i valori di riferimento del periodo 1991-2020*

Capitolo 15

Conclusioni per il 27-28 Luglio 1983

15.1 Circolazione Generale dell'Atmosfera

I giorni del 27-28 Luglio 1983 presentano una circolazione atmosferica estremamente anomala. Innanzitutto si identifica come causa predominante dell' ondata di calore, la massa anticiclonica nel mediterraneo. Essa non è altro che un' anomala espansione verso Nord dell'Anticiclone Africano. L'Anticiclone Africano è una struttura di alta pressione, collocata normalmente tra Sahara e Sahel, regioni molto aride e calde; raramente ma non eccezionalmente, si può assistere a una sua espansione verso Nord coinvolgendo la zona Mediterranea e l'Europa Meridionale. Quando ciò perdura per diversi giorni o settimane, si assiste a un vero e proprio blocco anticiclonico, che impedisce il normale transito di perturbazioni e il conseguente raffreddamento dell'aria.

Questo è esattamente quello che è accaduto nei due giorni di interesse, con serie conseguenze per le diverse variabili meteorologiche, come si mostrerà a breve.

Ma a spiegare l'eccezionalità dell' Ondata di Calore, non è solo l'Anticiclone Africano, ma anche la presenza di un anomalo anticiclone Atlantico. Il Nord Atlantico è solitamente caratterizzato dalla presenza di basse pressioni o strutture cicloniche, ma quello che si osserva invece è un vero e proprio blocco anticiclonico. Più precisamente un blocco Ω , [Kautz et al., 2022] ovvero caratterizzato da una zona di alta pressione, delimitata sia a occidente che ad oriente da cicloni, che si sta andando a fondere con l'Anticiclone Africano. Si noti infatti dalla Figura 13.2, come nel 27-28 Luglio, il ciclone che delimitava la struttura del blocco Ω , stia scomparendo (si notano solo dei minimi di pressione rimasti nella penisola Iberica, favorendo così l'unione tra i due sistemi anticiclonici. La presenza dell'anticiclone anomalo nell'Atlantico, contribuisce ulteriormente a impedire che qualsiasi perturbazione proveniente dell'oceano, possa alleviare l'Ondata di Calore.

15.2 Analisi delle variabili meteorologiche, che influenzano l'UTCI

Si considerano le variabili in prossimità dell'aerea di studio, ovvero il Nord Italia e l'Emilia Romagna.

- **MRT:** I valori dell'MRT estremamente alti per la media del periodo, sono causati dalla presenza del blocco anticiclonico. Infatti l'MRT non testimonia solo un forte irraggiamento solare per il 27 e 28 Luglio, ma anche un notevole irraggiamento termico dal suolo. Quest'ultimo causato dal notevole riscaldamento del terreno a seguito di molti giorni di tempo stabile e soleggiato.
- **Temperatura:** La temperatura alta per il periodo, ma non eccezionale, è causata dalla presenza dell'Anticiclone Africano, una massa di aria secca e calda di origine subtropicale.
- **Velocità del vento:** La velocità del vento molto bassa è causata anch'essa dalla presenza dell' Anticiclone Africano. Infatti i venti in prossimità dei massimi di un anticiclone sono molto deboli, in quanto il gradiente di pressione è basso.
- **Umidità Relativa:** La bassa umidità relativa è spiegabile anch'essa dalla presenza dell'anticiclone Africano, che formatosi in prossimità di aeree molto aride, il suo contenuto di vapore acqueo è molto ridotto.
- **UTCI:** L'UTCI eccezionale è causato dalle anomalie delle variabili da cui dipende. L'MRT estremamente alto, la temperatura alta, la velocità del vento prossima allo zero, hanno tutti contribuito a un valore anomalo, nonostante l'RH bassa abbia avuto un effetto contrario. Il contributo dei diversi parametri di può osservare in Tabella 15.1.

Variabile	Variazione dalla media del periodo
Velocità del vento	$\approx -2 \text{ m/s}$ (-7Km/h)
Temperatura a 2 metri (T)	$\approx +3^\circ\text{C}$
Umidità relativa (RH)	$\approx -25\%$
MRT (Mean Radiant Temperature)	$\approx +8^\circ\text{C}$
UTCI (Universal Thermal Climate Index)	$\approx +7^\circ\text{C}$

Tabella 15.1: La tabella mostra quanto è stata significativa la variazione rispetto alla media stagionale di ogni variabile, che contribuisce all' UTCI e sull'UTCI stesso.

il 27-28 Luglio 1983 in Emilia Romagna, si sono registrate temperatura di poco superiori alla media del periodo ($+3^\circ\text{C}$), dove anche la temperatura apparente, (l'indice

usato in Italia per la prevenzione climatica vedi Paragrafo 4) misurata a partire da temperatura e umidità relativa, era solo leggermente superiore alla media mensile, (si ricorda infatti una RH inferiore alla media per i due giorni). Nonostante ciò l'UTCI è risultato molto alto, a tratti estremo e quindi un pericolo per la popolazione locale.

Capitolo 16

Conclusioni per il 6-7 Luglio 2015

16.1 Circolazione generale dell'Atmosfera

Il 6 e 7 Luglio 2015, la circolazione atmosferica in Europa meridionale, è dominata dalla presenza di due strutture anticicloniche, l' anticiclone delle Azzorre e l'anticiclone africano. Per meglio comprendere tale circolazione atmosferica si osservi la Figura 33. Il primo anticiclone presenta il suo massimo di pressione nel medio atlantico, appunto in prossimità delle Azzorre, ma si estende fino al continente Europeo. Il secondo anticiclone invece presenta i massimi di alta pressione nel Mediterraneo. L' alta pressione di origine africana come discusso in precedenza, è abitualmente localizzata nelle regioni aride del Nord Africa, ma raramente può raggiungere il mediterraneo, portando aria molto secca e calda e agire come un vero e proprio blocco anticiclonico che ostacola il passaggio di precipitazioni e la normale circolazione atmosferica. Invece l'anticiclone delle Azzorre è una struttura tipica dell' Europa Meridionale durante il periodo estivo, quando quest'ultimo tende a svilupparsi verso Est fino a toccare il continente Europeo. Mentre la presenza dell'anticiclone delle Azzorre è comune, e la presenza dell' anticiclone Africano è rara ma non eccezionale, risulta anomala, la presenza collettiva di entrambi i fenomeni, con un impatto molto importante sul clima dell' Europa. Infatti l'anticiclone Africano, solitamente caratterizzato da bassa umidità, richiama aria più umida dall' anticiclone delle Azzorre, aumentandone così l'umidità e il conseguente stress termico percepito.

16.2 Analisi delle variabili meteorologiche che influenzano l'UTCI

Si considerano le variabili in prossimità dell' area di studio, ovvero il Nord Italia e l'Emilia Romagna.

- **MRT:** I valori dell'MRT alti per la media del periodo, sono causati dalla presenza del blocco anticiclonico. Infatti l'MRT non testimonia solo un forte irraggiamento solare per il 6 e 7 Luglio, ma anche un notevole irraggiamento termico dal suolo. Quest'ultimo causato dal notevole riscaldamento del terreno a seguito di molti giorni di tempo stabile e soleggiato. Interessante il confronto con i valori del 1983, dove seppur con un MRT simile, per il 6-7 Luglio 2015 risulta una discrepanza minore dai valori medi per il periodo, rispetto al 27-28 Luglio 1983. Quale può essere la causa?

La risposta è nelle diverse ore di irraggiamento solare giornaliero. Maggiori a inizio Luglio, più vicino al solstizio d'estate, rispetto a fine Luglio. E quindi per inizio Luglio l'MRT medio è maggiore.

- **Temperatura:** La temperatura alta per il periodo, ma non eccezionale, è causata dalla presenza dell'Anticiclone africano, una massa di aria secca e calda di origine subtropicale.
- **Velocità del vento:** La velocità del vento bassa è causata dalla presenza dell'anticiclone africano. Ma a differenza però con il caso del 1983, la velocità del vento è, seppur di poco, maggiore. La probabile causa è che mentre nel 1983 il massimo anticiclonico era proprio sul Nord Italia, nel 2015 è più lontano, verso le Baleari, e ciò porta un gradiente di pressione maggiore in Italia e quindi un vento leggermente più intenso.
- **Umidità Relativa:** L'alta umidità Relativa è spiegabile dall'afflusso di aria umida proveniente dall'anticiclone delle Azzorre, che formatosi in acque oceaniche, ha un alto contenuto di vapore acqueo.
- **UTCI:** L'UTCI eccezionale è causato dalle anomalie delle variabili da cui dipende. L' MRT estremamente alto, la temperatura alta, la velocità del vento bassa, e l'alta RH hanno tutti contribuito a un valore anomalo. Il contributo dei diversi parametri di può osservare in Tabella 16.1.

Variabile	Variazione dalla media del periodo
Velocità del vento	$\approx -1 \text{ m/s}$ (-4Km/h)
Temperatura a 2 metri (T)	$\approx +4^\circ\text{C}$
Umidità relativa (RH)	$\approx +25\%$
MRT (Mean Radiant Temperature)	$\approx +6^\circ\text{C}$
UTCI (Universal Thermal Climate Index)	$\approx +7^\circ\text{C}$

Tabella 16.1: La tabella mostra quanto è stata significativa la variazione rispetto alla media stagionale di ogni variabile, che contribuisce all' UTCI e sull'UTCI stesso.

Per la zona dell'Emilia Romagna, nelle giornate del 6 e 7 Luglio 2015, si sono verificate temperature superiori alla media del periodo, ma non eccezionali dal punto di vista climatologico (+4°C). Nonostante ciò, l' UTCI è risultato molto alto, a tratti estremo e quindi un pericolo per la popolazione locale.

Conclusioni

Lo studio ha mostrato come le diverse definizioni di ondate di calore, usate per la prevenzione, e per la salvaguardia della salute, sono spesso insufficienti rispetto ad alcuni eventi anomali. In particolare le definizioni basate su un solo parametro, spesso la temperatura, risultano inadeguate per comprendere l'impatto di un fenomeno atmosferico sulla popolazione. Nelle quattro giornate analizzate, si sono verificati eventi di una certa gravità, ma sottovalutati dai più comuni sistemi di prevenzione, a causa di una temperatura dell'aria, che non si è discostata molto dai valori usuali. Ma nonostante ciò, la particolare circolazione atmosferica, ha favorito valori anomali per altre variabili meteorologiche, che hanno anch'esse un impatto significativo sul comfort termico, in particolare l'MRT, l'umidità relativa, e la velocità del vento. L'UTCI, che è il parametro che meglio rappresenta lo stress climatico percepito è risultato perciò, per i giorni di interesse, estremamente alto, con valori di 9-10 sulla scala dell'UTCI, che corrispondono a stress termico molto alto o estremo.

Legenda dei Simboli

- U : Energia potenziale gravitazionale.
- h : Quota dal suolo.
- m : Massa d'aria.
- X_i : Valore della variabile nel membro i dell' ensemble.
- \bar{X} : Valore medio della variabile su tutti gli ensemble.
- N : Numero di membri dell' ensemble (tipicamente $N = 10$ in ERA5).
- σ_X : Deviazione standard della variabile X .
- σ_T : Incertezza totale della temperatura.
- $U10, V10$: Componenti della velocità del vento a 10 metri (zonale e meridionale).
- T : Temperatura a 2 metri dal suolo.
- RH : Umidità relativa.
- $MSLP$: Pressione al livello del mare.
- MRT : Mean Radiant Temperature (Temperatura media radiante).
- $UTCI$: Universal Thermal Climate Index.
- θ : Angolo di direzione del vento.
- e : Pressione effettiva vapore acqueo
- e_s : Pressione di Saturazione del Vapore Acqueo
- V : Velocità del vento complessiva
- 0.25° : gradi sistema di riferimento terrestre (Longitudine-Latitudine)

- m/s o $\frac{m}{s}$: metri al secondo.
- hPa: unità misura della pressione atmosferica usata in questo testo.
- $EHI_{sig}(t)$: Indice di significatività del calore.
- $EHI_{accl}(t)$: Indice di acclimatazione.
- EHF: Excess Heat Factor
- $T_3(t)$: Temperatura media su 3 giorni
- $T_3(t)$: Temperatura media su 30 giorni.
- $T_{95}(t)$: Temperatura corrispondente al 95° percentile.
- fp : Fattore di proiezione superficiale.
- γ : Angolo di elevazione solare.
- L_{surf}^{dw} : Componente discendente della radiazione termica.
- L_{surf}^{up} : Componente ascendente della radiazione termica.
- S_{surf}^{diff} : Componente diffusa della radiazione solare.
- S_{surf}^{up} : Componente riflessa della radiazione solare.
- I^* : Irradianza solare diretta.
- σ : Costante di Stefan-Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 K^4)$).
- α_{ir} : Coefficiente di assorbimento della superficie corporea irradiata dalla radiazione solare (valore standard 0.7).
- ε_p : Emissività del corpo umano vestito (valore standard 0.97).
- fa_a : Fattore angolare, con valore standard 0.5.
- λ : Lunghezza d'onda.
- μm : Unità di misura della lunghezza d'onda usata in questo testo.

Bibliografia

[ECM, 2023] (2023). Reanalysis.

[ERA, 2025] (2025). Era5 dataset.

[Brune, 2023] Brune, W. (2023). Why do weather maps use pressure surfaces instead of height surfaces? [https://geo.libretexts.org/Bookshelves/Meteorology_and_Climate_Science/Book%3A_Fundamentals_of_Atmospheric_Science_\(Brune\)/10%3A_Dynamics_-_Forces/10.08%3A_Why_do_weather_maps_use_pressure_surfaces_instead_of_height_surfaces](https://geo.libretexts.org/Bookshelves/Meteorology_and_Climate_Science/Book%3A_Fundamentals_of_Atmospheric_Science_(Brune)/10%3A_Dynamics_-_Forces/10.08%3A_Why_do_weather_maps_use_pressure_surfaces_instead_of_height_surfaces).

[Di Napoli et al., 2020] Di Napoli, C., Barnard, C., Prudhomme, C., Cloke, H. L., and Pappenberger, F. (2020). Thermal comfort indices derived from era5 reanalysis.

[ECMWF, 2024] ECMWF (2024). Era5: Uncertainty estimation. <https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5%3A+uncertainty+estimation>.

[Hersbach et al., 2023] Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., and Thépaut, J.-N. (2023). Era5 hourly data on single levels from 1940 to present.

[Hooyberghs, 2023] Hooyberghs, H. (2023). Heat waves and cold spells in europe derived from climate projections documentation.

[Kanti et al., 2022] Kanti, F. S., Alari, A., Chaix, B., and Benmarhnia, T. (2022). Comparison of various heat waves definitions and the burden of heat-related mortality in france: Implications for existing early warning systems. *Environmental Research*, 215:114359.

[Kautz et al., 2022] Kautz, L.-A., Martius, O., Pfahl, S., Pinto, J. G., Ramos, A. M., Sousa, P. M., and Woollings, T. (2022). Atmospheric blocking and weather extremes over the euro-atlantic sector – a review. *Weather and Climate Dynamics*, 3(1):305–336.

[meteoblue,] meteoblue. Precisione dei dati meteorologici.

- [Novak, 2013] Novak, M. (2013). Use of the utci in the czech repub. *Czech Hydrometeorological Institute*.
- [Pappenberge, 2020] Pappenberge, C. D. N. C. B. C. P. H. L. C. F. (2020). Thermal comfort indices derived from era5 reanalysis. *Geoscience Data Journal*.
- [RJ, 2014] RJ, F. (2014). The excess heat factor: a metric for heatwave intensity and its use in classifying heatwave severity.
- [Robinson, 2001] Robinson, P. J. (2001). On the definition of a heat wave. *Journal of Applied Meteorology*, 40(4):762 – 775.
- [Song et al., 2022] Song, H., Kong, D., Xiong, L., Gu, X., and Liu, J. (2022). Inter-comparison of diverse heatwave definitions in the analysis of spatiotemporally contiguous heatwave events over china. *Remote Sensing*, 14(16).
- [(WMO), 2021] (WMO), W. M. O. (2021). Updated 30-year reference period reflects changing climate.
- [Zare et al., 2018] Zare, S., Hasheminejad, N., Shirvan, H. E., Hemmatjo, R., Sarebanzadeh, K., and Ahmadi, S. (2018). Comparing universal thermal climate index (utci) with selected thermal indices/environmental parameters during 12 months of the year. *Weather and Climate Extremes*, 19:49–57.
- [Zofia, 2023] Zofia, B. (2023). What is a heat(wave)? an interdisciplinary perspective.