



Università degli Studi di Milano – Bicocca
DIPARTIMENTO DI SCIENZE DELL'AMBIENTE E DELLA TERRA

Corso di Laurea in
Scienze e Tecnologie per l'Ambiente

SALUTE E BENESSERE IN AMBIENTE URBANO: ONDATE DI CALORE E PRINCIPALI INDICI BIOMETEOROLOGICI.

Relatore:

Prof. Mattia de Amicis

Prova finale di Laurea di:

Francesca Ceriotti

Relatore esterno:

Dott.ssa Samantha Pilati

Matricola:

816351

INTRODUZIONE	1
1 CAMBIAMENTI CLIMATICI -CLIMATE CHANGE-.....	2
2 CLIMA URBANO	4
2.1 ISOLA DI CALORE	5
3 ONDATE DI CALORE	7
3.1 CASO STUDIO DA BIBLIOGRAFIA	9
3.2 SISTEMA TERMOREGOLATORE	10
3.2.1 <i>Benessere termico</i>	10
3.3 INDICI BIOMETEOROLOGICI.....	12
3.3.1 <i>Humidex</i>	12
3.3.2 <i>Temperatura apparente</i>	13
3.3.3 <i>Heat index</i>	14
3.3.4 <i>Net Effective Temperature (NET)</i>	16
4 DATI IMPIEGATI NELLA TESI: CLIMATE NETWORK®	18
5 ELABORAZIONE E ANALISI DEGLI INDICI BIOMETEOROLOGICI.....	20
5.1 CONFRONTO FRA HUMIDEX, HEAT INDEX E TEMPERATURA APPARENTE.....	20
5.1.1 <i>Confronto tra diverse città italiane</i>	26
5.2 FOCUS SULLE ONDATE DI CALORE.....	29
5.3 INDICE DI NET EFFECTIVE TEMPERATURE APPLICATO ALLA CLIMATE NETWORK®	33
6 CONCLUSIONI.....	35
BIBLIOGRAFIA E SITI CONSULTATI	38
APPENDICE A.....	41
RINGRAZIAMENTI	42

Introduzione

Negli ultimi anni, le estati sono state caratterizzate da numerose ondate di calore, le quali hanno causato e causano tutt'ora migliaia di morti in tutto il mondo.

L'estate del 2003, interessata da un aumento del tasso di mortalità, ha indotto l'intervento di diverse istituzioni, le quali hanno introdotto protocolli di monitoraggio, allerta e prevenzione.

Per studiare le ondate di calore e i loro effetti sulla salute sono fondamentali gli indici biometeorologici. Questi algoritmi permettono di calcolare la temperatura percepita dal corpo umano mettendo in relazione, tramite formule semi-empiriche, temperatura dell'aria, umidità relativa e talvolta anche altri variabili meteorologiche quali velocità del vento e radiazione solare.

Lo scopo del progetto è quello di calcolare e confrontare alcuni tra gli indici biometeorologici più noti.

Per questo studio sono stati utilizzati i dati meteorologici della rete Climate Network®, risultando fondamentali per il calcolo degli indici.

Nel capitolo 5, in particolare, verrà effettuata un'analisi degli indici per diverse zone della città di Milano, con lo scopo di evidenziare come l'eterogeneità tipica dei centri urbani influenzi in modo diverso le temperature percepite.

Successivamente lo stesso confronto verrà effettuato su diverse città d'Italia, in modo tale da valutare come gli indici variano al variare delle condizioni climatiche.

Particolare attenzione verrà poi posta nei confronti di alcune delle ondate di calore più violente degli ultimi anni. Saranno valutati i vari indici calcolati per la stazione di Milano Centro, e anche l'andamento del tasso di mortalità durante le ondate.

Infine, verrà valutata quale tra le città della rete Climate Network® risulta essere la più calda secondo l'indice di Net Effective Temperature.

1 Cambiamenti climatici -Climate Change-

I cambiamenti climatici, contrariamente a ciò che si pensa, sono tipici del sistema climatico terrestre.

I fattori che influenzano il sistema climatico sono molteplici, come ad esempio l'attività solare, l'orbita della Terra rispetto al Sole, la composizione dell'atmosfera e l'attività vulcanica.

I cambiamenti climatici anomali, invece, sono dettati dalle attività umane che inizialmente influenzavano il clima solo a livello locale. Con l'avvento della rivoluzione industriale, tali attività andarono via via ad alterare la composizione dell'atmosfera a livello globale. Questi mutamenti sono dovuti all'immissione in atmosfera dei gas serra¹ che hanno inevitabilmente provocato un aumento dell'effetto serra.

L'effetto serra è anch'esso un fenomeno naturale ed è dovuto ad uno strato di gas, i quali sono in grado di assorbire parte dei raggi solari riflessi dalla Terra e successivamente di rifletterli sulla superficie terrestre, mantenendo le temperature al di sopra del punto di congelamento dell'acqua. L'effetto serra, quindi, risulta fondamentale per la vita sulla Terra.

(1) Le problematiche legate a questo fenomeno sono dovute al fatto che negli ultimi anni la concentrazione dei gas in atmosfera è aumentata esponenzialmente. Le cause di questo fenomeno sono legate

- al crescente utilizzo dei combustibili fossili,
- alla deforestazione,
- all'aumento degli allevamenti intensivi
- all'utilizzo di fertilizzanti chimici. (2)

La conseguenza principale dell'effetto serra è il surriscaldamento globale.

Il global warming, o riscaldamento globale, viene definito dall'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) come un aumento delle temperature in rapporto alla temperatura media ottenuta da un trentennio di misurazioni, ovvero un CLINO. Un CLINO, più in generale, è la media di un dato meteorologico ricavata da un trentennio di dati.

¹ I gas serra principali sono vapore acqueo, anidride carbonica, metano e protossido di azoto.

I CLINO vengono utilizzati principalmente come previsione delle condizioni climatiche che si verificheranno nel breve periodo in un dato luogo e come riferimento in rapporto a cambiamenti climatici osservabili di lungo termine.

Se si considera un clima non alterato, basterebbe un unico CLINO per soddisfare le due affermazioni precedenti ma ultimamente risulta essere necessario utilizzarne due differenti. Come afferma il WMO, nel “WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals”, il CLINO 1981-2010 risulta essere più rappresentativo delle condizioni climatiche del 2017 rispetto a quello 1961-1990. Quest’ultimo viene utilizzato però come riferimento per la stima dei cambiamenti climatici a lungo termine. (3)

Secondo l’IPCC le attività umane hanno contribuito al riscaldamento globale sin dal 1750. Inoltre, si ritiene che il global warming causato da attività umane abbia effetti notevolmente maggiori rispetto a quelli causati da fattori naturali.

Ad oggi la temperatura media globale è aumentata di 0,8°C dalla rivoluzione industriale ma, sempre secondo l’IPCC, l’innalzamento delle temperature dovuto ad attività antropiche passate raggiungerà gli 1,5 °C tra il 2030 e il 2052. Anche se s’intervenisse nel breve periodo, riducendo a zero le emissioni di origine antropica, le temperature probabilmente continuerebbero ad aumentare ancora per un lungo periodo. (4)

È fondamentale però intervenire cercando di mantenere il riscaldamento globale al di sotto dei 2°C in modo da evitare conseguenze irreversibili.

Ondate di calore, siccità, scioglimento dei ghiacciai, alluvioni sono alcune delle conseguenze del riscaldamento globale che già si stanno verificando. Fenomeni come questi si accentuano nell’ambiente urbano, dove si verifica il fenomeno dell’isola di calore. Un esempio eclatante è stata l’alluvione avvenuta a Genova il 4 novembre 2011.

Il global warming risulta essere anche un pericolo per la salute dell’essere umano stesso. Infatti, ondate di calore causano l’innalzamento del tasso di mortalità soprattutto per i soggetti a rischio, quali anziani e bambini; ma provoca anche la sopravvivenza e diffusione di insetti vettori di malattie come malaria e la febbre Dengue. Ciò accade a causa di un cambiamento nella distribuzione delle precipitazioni che di conseguenza provoca un cambiamento nei cicli vitali dei predatori di questi insetti. (5)

2 Clima Urbano

La popolazione umana dal 1800 al 2015 è cresciuta passando da 1 a 7 miliardi di persone, e proporzionalmente la percentuale di popolazione abitante nei centri urbani è passata dall'3% al 50%. Ciò ha provocato un aumento degli edifici in città con una conseguente riduzione delle aree verdi, e un aumento nelle emissioni di gas serra.

L'ambiente urbano presenta due caratteristiche che influenzano l'atmosfera: la prima è relativa ai cambiamenti apportati alla superficie, la seconda riguarda le immissioni di gas in atmosfera da parte dell'uomo.

Il tessuto urbano costituito da edifici, strade e vegetazione determina le capacità radiative, termiche della superficie. Su strade asfaltate il calore viene assorbito; invece se presente vegetazione, il calore, viene rilasciato in atmosfera tramite evapotraspirazione.

La distanza, l'altezza tra gli edifici e la dimensione delle strade modificano l'andamento dei raggi solari e riducono l'albedo². Ciò provoca un aumento delle temperature.

Analizzando gli impatti delle emissioni dovute ad attività umane, essi possono essere di tipo sia diretto che indiretto. Gli effetti diretti riguardano la perdita di calore da parte di case e automobili, i quali riscaldando l'aria circostante; mentre quelli indiretti includono i processi per cui gli inquinanti interferiscono con la radiazione oppure l'immissione di gas serra, i quali aumentano l'effetto serra. (6)

All'interno di un centro urbano, gli effetti del cambiamento climatico come le ondate di calore o le alluvioni vengono amplificati. Inoltre, un fenomeno particolare che interessa le città è l'isola di calore.

² Rapporto fra l'intensità di radiazione riflessa da un materiale e quella con cui è stato irraggiato. (Treccani)

2.1 Isola di calore

Una serie di studi ha dimostrato che le temperature in città sono spesso superiori rispetto alle zone adiacenti: il fenomeno viene definito *isola di calore*. Le cause sono molteplici come ad esempio:

- i materiali utilizzati per la costruzione di edifici e strade, come cemento e asfalto che accumulano calore durante il giorno e lo rilasciano durante la notte
- una minor perdita di calore radiante nell'urban canopy layer
- un diverso bilancio idrico ed energetico
- una minor velocità del vento rispetto a zone rurali

Le temperature variano anche all'interno della città stessa, poiché la struttura della superficie urbana è eterogenea. L'orientamento geografico dei cosiddetti urban canyon³ modifica la velocità dei venti rallentandola, e l'esposizione ai raggi solari, alterando il microclima urbano. (7)

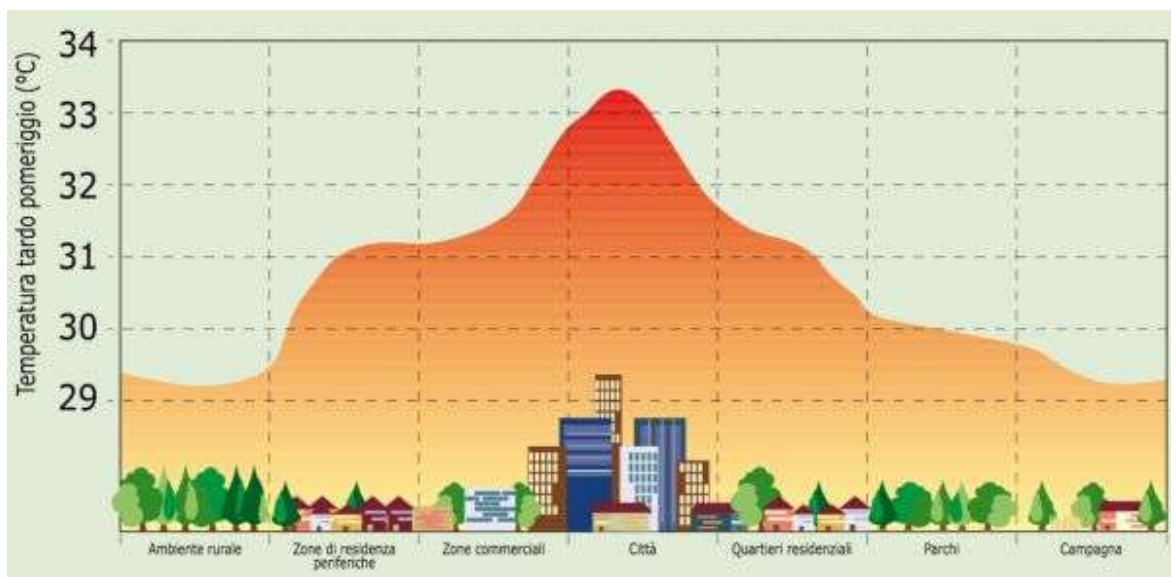


Figura 1 Differenze di temperatura tra città e le aree circostanti. (8)

Negli urban canyon la radiazione viene in parte assorbita e riflessa dalle pareti un numero di volte che è in funzione dell'altezza degli edifici e della larghezza della strada, provocando un aumento delle temperature. (9)

³ Urban canyon sono dei veri e propri canyon artificiali dati da alti edifici separati da una strada.

Cercando di mitigare questo fenomeno si ridurrebbero, oltre ai decessi dovuti a colpi di calore, anche i consumi energetici degli impianti di raffrescamento e di conseguenza i gas serra e l'inquinamento atmosferico.

Ciò è possibile installando particolari materiali con un'elevata albedo sui tetti e sulle strade. Anche la vegetazione se posizionata sui tetti o tra gli edifici può portare dei benefici, grazie all'evapotraspirazione⁴ e all'ombreggiamento. L'evapotraspirazione, essendo un processo endotermico, sottrae energia dall'ambiente circostante abbassandone la temperatura. (10)

⁴ È un processo che prevede l'assorbimento d'acqua dalle radici e il rilascio di questa sotto forma di vapore acqueo. Processo che avviene durante l'organizzazione della CO₂.

3 Ondate di calore

Un'ondata di calore dal WMO, e dal WHO⁵, viene definita come un periodo di almeno due giorni consecutivi in cui le temperature minime e massime superano il 95-esimo percentile⁶ dei valori di temperatura locali. (11)

Questi eventi, sempre più intensi, causano un aumento dei tassi di mortalità e morbidità. Le ondate di calore più pericolose risultano spesso essere quelle che si verificano tra il mese di maggio-giugno. (12) Le successive provocano meno decessi in quanto il corpo umano è in grado di adattarsi anche a condizioni climatiche estreme.

L'estate del 2003 è stata caratterizzata da caldo anomalo che ha interessato tutto il continente Europeo.

Sin da maggio, a Milano, si sono riscontrate temperature elevate registrando una temperatura media mensile maggiore di 4°C rispetto alla media del CLINO 1961-1990. La temperatura massima registrata, sempre a Milano, ha superato i 30°C.

Anche giugno e luglio sono stati caratterizzati da caldo intenso, ma le temperature massime più elevate registrate si sono verificate durante il mese di agosto, quando hanno superato i 39°C. (13)

In uno studio condotto dall'Istituto Superiore della Sanità è stato confrontato il numero di decessi del periodo tra il 1° giugno e il 15 agosto del 2002 con quello del 2003 per avere un quadro più chiaro riguardante gli effetti delle ondate di caldo sulla salute. Lo studio si è avvalso dei dati rilevati su 21 comuni (capoluoghi di Regione), ed è stato riscontrato un aumento di 2222 decessi, passando dai 17493 decessi nel 2002 ai 19715 del 2003. L'incremento massimo si è riscontrato nella popolazione di età superiore ai 65 anni di età. (14)

In seguito all'ondata di calore 2003 che ha coinvolto l'Italia, e in generale tutta Europa, Protezione Civile e Ministero della Salute hanno introdotto un piano di prevenzione degli effetti delle ondate di calore, specialmente sugli anziani. Questi ultimi, infatti, sono particolarmente a rischio perché il sistema termoregolatore con l'avanzare dell'età rallenta.

⁵ World Health Organization: Organizzazione Mondiale della Sanità

⁶ 95-esimo percentile significa che il 95% dei dati si trova al di sotto di un certo valore.

Il piano, diffuso dal dipartimento di Protezione Civile, è costituito da:

- gli Heat Health Watch Warning Systems specifici per ogni città
- una rete locale che ha il compito di diffondere i bollettini di allerta
- linee guida di prevenzione
- registri locali che individuano i soggetti a rischio nella popolazione
- un sistema di sorveglianza del tasso di mortalità
- una valutazione del sistema di allerta e prevenzione introdotti

Gli Heat Health Watch Systems (HHWWS) sono sistemi in grado di prevedere condizioni meteorologiche estreme e il loro impatto sulla salute. Tali modelli si basano sull'analisi dei dati di mortalità e dati meteorologici in modo tale da andare a identificare in quali condizioni climatiche si verifica un aumento del tasso di mortalità.

Il sistema di allerta è gestito dal Dipartimento di Epidemiologia della Regione Lazio che si coordina con gli enti locali.

Il sistema che controlla in tempo reale l'andamento del tasso di mortalità a livello nazionale ha il compito di monitorare l'eccesso di mortalità di anziani sopra i 65 anni di età durante il periodo estivo. (11)

Per un sistema di allerta efficace è necessario individuare i soggetti che sono maggiormente a rischio. Oltre agli anziani vanno presi in considerazione i malati, gli individui socialmente isolati o che si trovano in condizioni economiche instabili. (15)

Recentemente, sempre l'Istituto Superiore della Sanità ha studiato l'andamento dei tassi di mortalità di una popolazione di età superiore ai 65 anni, in 33 città italiane nel periodo estivo che va dal 15 maggio al 15 settembre del 2015.

Le temperature, in questo periodo, sono state superiori ai valori medi del CLINO 1971-2000; in modo particolare a luglio si sono registrate temperature di 2-4°C maggiori rispetto al riferimento. Secondo i dati forniti da Fondazione OMD riguardanti Milano, luglio è stato caratterizzato da due ondate di calore, una dal 4 al 7 luglio e una seconda di maggior entità dal 13 al 23 luglio. In questo mese si sono verificati gli eccessi di mortalità più significativi del 2015.

Considerando l'intero periodo gli eccessi di mortalità più significativi hanno interessato le città del centro-nord come Pescara, Bologna e Roma. A livello giornaliero le città con una percentuale di decessi maggiori sono state Aosta e Padova.

Nella tabella in Appendice A vengono riportati i valori di decessi per mese, i valori dei decessi osservati sopra i 65 anni di età, quelli attesi, la differenza dei primi con i secondi, la valutazione percentuale e il relativo p-value. (16)

3.1 Caso studio da bibliografia

Le ondate di calore non solo aumentano il tasso di mortalità ma diminuiscono anche le capacità cognitive.

Recentemente è stato condotto uno studio su una coorte di studenti universitari di una regione del Massachusetts negli Stati Uniti, i quali sono stati seguiti e sorvegliati per 12 giorni dal 9 al 20 luglio 2016, durante un'ondata di calore⁷.

Gli studenti scelti sono stati suddivisi in due gruppi, uno alloggiava in camere dotate di aria condizionata mentre l'altro no.

La settimana antecedente all'esperimento gli studenti hanno dovuto compilare un sondaggio su età, sesso, altezza e peso e sulla qualità del loro sonno. Nel mentre, erano sottoposti a test cognitivi come lo STROOP color-word test o il test di addizione e sottrazione visivo per valutare la capacità mnemonica (test ADD). Il test teneva conto anche dell'idratazione, chiedendo il numero di bicchieri assunti, e le ore di sonno.

In ogni camera è stato installato un monitor che misurava temperatura, umidità relativa, concentrazione di CO₂ e rumore. Per rilevare la qualità del sonno gli studenti indossavano rilevatori basati sull'actigrafia, ovvero rilevatori in grado di riconoscere se lo studente fosse sveglio o meno.

Dai risultati dello studio si evince che la temperatura media del gruppo di studenti che viveva in camere senza aria condizionata era, come ci si aspettava, più elevata di chi l'aveva; il contrario invece per quanto riguarda l'umidità relativa e i livelli di CO₂.

Per l'analisi dei test cognitivi sono stati confrontati i risultati con i modelli DiD (differences in differences, il quale considera che la differenza tra i due gruppi sia rimasta costante per tutto il periodo); essi evidenziavano deficit significativi sia prima dell'effettiva ondata di calore che dopo, da parte del gruppo senza aria condizionata. Inoltre, anche dopo l'ondata di calore gli effetti non diminuiscono perché la stanza tende a mantenere il calore interno.

⁷ In questo caso viene definita ondata di calore un evento consecutivo di due giorni per cui le temperature superano il 91-esimo percentile di 10 anni di dati.

Per il mantenimento delle funzioni cognitive è risultata rilevante l'idratazione; infatti coloro che hanno assunto meno di 6 bicchieri al giorno hanno avuto maggiori deficit al test ADD, effetto contrario lo aveva chi assumeva bevande con caffeina.

Si evince da questo studio che risulta quasi indispensabile la presenza di un sistema di raffrescamento negli edifici, per evitare ripercussioni a livello cognitivo.

Il loro utilizzo provoca d'altra parte un incremento nell'emissione dei gas serra. Una soluzione possibile potrebbe essere l'utilizzo di materiali innovativi per la costruzione di edifici. (17)

3.2 Sistema termoregolatore

La temperatura corporea è data dall'equilibrio tra produzione e perdita di calore. La temperatura interna tende a rimanere costante attorno ai 37 °C, a differenza di quella esterna che varia in base alle condizioni climatiche esterne e all'attività svolta dall'individuo.

La termoregolazione ha il compito di mantenere la temperatura attorno ai 37°C, ed è uno dei motivi per cui il corpo umano è un sistema omeostatico.

L'ipotalamo è il centro di comunicazione tra sistema endocrino e nervoso e, tra le varie funzioni, ha anche il compito di regolare la temperatura corporea.

L'ipotalamo è in grado di percepire le variazioni anche minime della temperatura corporea, anche grazie alla presenza di termocettori presenti sulla pelle, e stimola i cambiamenti necessari in grado di riportare la temperatura corporea a 37°C. Nel caso in cui la temperatura superi questo valore, l'ipotalamo attiva meccanismi di vasodilatazione e sudorazione; al contrario se la temperatura è inferiore ai 37°C entrano in gioco meccanismi di vasocostrizione e brividi. (18)

3.2.1 Benessere termico

Il benessere termico è la condizione per cui il corpo umano, anche con un minimo sforzo termoregolatore, non sente né caldo né freddo. Ciò si verifica quando temperatura, umidità relativa e velocità del vento assumono certi valori: in estate ad esempio la temperatura di comfort si trova tra i 24°C e i 26°C, l'umidità relativa tra il 50% e il 60% e la velocità del vento si aggira tra gli 0,1 e 0,2 m/s. Tali parametri sono definiti prendendo come riferimento una persona che svolge un'attività sedentaria, non esposta al sole e con un abbigliamento consono. (19)

Normalmente il corpo, in condizioni di caldo, tende a raffreddarsi sudando. In condizioni di elevata umidità il sudore, però, non evapora rapidamente, quindi la temperatura corporea aumenta.

I sintomi del colpo di calore sono molteplici: aumento della temperatura del corpo superiore ai 42°C, convulsioni, perdita di coscienza, coma e decesso. (20)

Particolarmente a rischio sono gli individui più anziani. Nel caso in cui le temperature massime superano i 35°C in zone d'ombra per diversi giorni consecutivi, l'organismo di un soggetto anziano è colpito da una diminuzione delle difese immunitarie, da una pressione minima più bassa della norma, da una sensazione di malessere e stanchezza, da un'eccessiva sudorazione con conseguente perdita di sali minerali e liquidi, da apatia, in alcuni casi da collasso da calore, diminuzione dell'attenzione e vuoti di memoria temporanei, poliuria⁸. (21)

Generalmente i disturbi provocati da caldo estremo possono essere di lieve entità come crampi, mancamenti, edemi, o di elevata entità come congestione, colpo di calore e disidratazione. (22)

Per questo motivo negli ultimi anni ci si concentra sullo studio delle ondate di calore e di come il corpo percepisce la temperatura esterna: per studiare lo stress termico ci si avvale degli indici biometeorologici. Essi descrivono, attraverso combinazioni di temperatura, umidità, vento e radiazione, la cosiddetta temperatura percepita, la quale non è da confondersi con la temperatura dell'aria. Infatti, vedremo poi che tra la temperatura dell'aria e quella percepita ci sono differenze sostanziali.

⁸ Poliuria: aumento temporaneo o permanente della quantità di urina emessa.

3.3 *Indici biometeorologici*

Gli indici biometeorologici sono algoritmi semi-empirici che descrivono, attraverso combinazioni di temperatura, umidità e, in alcuni casi, anche la velocità del vento, come l'uomo è in grado di percepire la temperatura esterna. Insieme ai dati sulla salute, tali indici ci permettono di individuare i valori soglia oltre i quali il calore ha un effetto negativo sulla salute. Ovviamente sono valori indicativi dato che la percezione della temperatura esterna è soggettiva. (11)

Di seguito vengono descritti i quattro indici biometeorologici che sono stati calcolati in questo elaborato a partire dai dati della rete Climate Network®: Humidex, Heat Index, Temperatura Apparente e Net Effective Temperature.

3.3.1 *Humidex*

È un indice ideato dai meteorologi canadesi Masterton J.M. e Richardson F.A. nel 1965 (23). Viene utilizzato per descrivere come un clima caldo-umido sia percepito dall'uomo. Le variabili climatiche considerate sono la temperatura e l'umidità relativa e si calcola tramite la seguente formula:

$$H = T + \frac{5}{9} * (6,11 * \frac{UR}{100} * 10^{\frac{7,5*T}{237,7+T}} - 10)$$

- T= temperatura dell'aria
- UR= umidità relativa

Questo indice è applicabile per temperature superiori ai 20°C, altrimenti si pone che l'Humidex coincide con la temperatura stessa dell'aria. A seconda del range di valori che assume l'Humidex esso viene associato a un certo livello di discomfort. Se assume un valore minore di 29°C non si avverte alcun disagio, tra 30°C e 39°C si avverte un disagio modesto, tra 40°C e 45°C si prova un disagio elevato. Al di sopra dei 45°C ci si trova in una condizione di pericolo, infine sopra i 54°C si è a rischio infarto.

Un valore di Humidex superiore ai 40°C è da considerarsi particolarmente pericoloso e quindi andrebbero evitate tutte le attività non strettamente necessarie. (11)

Questo indice è uno dei più usati anche dagli enti italiani come ad esempio ARPA Lombardia.

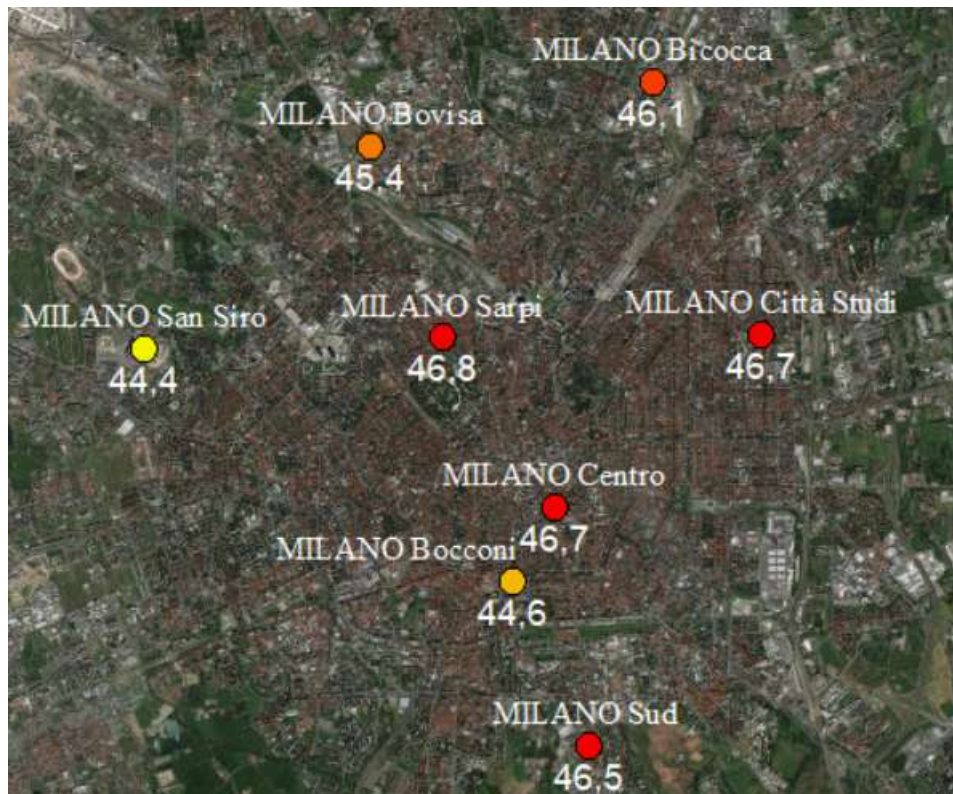


Figura 2 Valori di Humidex massimo registrati nelle stazioni meteorologiche di Milano nell'estate del 2019

Nella figura sovrastante possiamo notare come i valori massimi di Humidex registrati nell'estate del 2019 abbiano superato ampiamente i 40°C e in alcune stazioni addirittura i 45°C.

3.3.2 *Temperatura apparente*

È un indice biometeorologico utilizzato dal Bureau of Meteorology, ente meteorologico australiano, e risulta essere un'approssimazione del valore dato da un modello matematico riguardante l'equilibrio del calore corporeo. Questo include oltre alle variabili di temperatura e umidità anche quelli di velocità del vento e radiazione solare. Per calcolare la temperatura apparente esistono due formule, una che include la radiazione solare (1.) e una no (2.):

1. $AT = T_a + 0,348 * e - 0,70 * ws + 0,70 * \frac{q}{(ws+10)} - 4,25$
2. $AT = T_a + 0,33 * e - 0,70 * ws - 4,00$

T_a = temperatura dell'aria (°C)

e = tensione di vapore (hPa)

w_s = velocità del vento (m/s) a 10 m da terra

Q = radiazione netta assorbita per unità di area della superficie corporea (W/m^2) (11)

Il valore soglia oltre al quale si avverte disagio termico, per la Temperatura Apparente, è di 32,2°C

3.3.3 Heat index

L'Heat Index (HI) è un indice diffuso dal National Weather Service (NWS)⁹ che viene utilizzato come sistema di allerta durante le ondate di calore. Come l'Humidex pone in relazione temperatura e umidità relativa, utilizzando diversi parametri standard. Per il calcolo dell'Heat Index non vi è un algoritmo universale ma ben ventuno differenti algoritmi.

Questi algoritmi che calcolano l'heat index non sono altro che semplificazioni della temperatura apparente di Steadman, indice formulato nel 1979. Quest'ultimo è stato sviluppato per valutare il comfort termico e non per studiare la salute dell'uomo, a differenza dell'Heat Index.

La temperatura apparente di Steadman si ottiene approssimando diverse equazioni che descrivono scambi di calore e umidità, a una sola equazione finale.

		Relative humidity (%)											
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
Temperature (°C)	50	42	48	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	49	42	47	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	48	41	45	53	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	47	40	44	51	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	46	39	43	49	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	45	38	42	47	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	44	38	41	45	52	-	-	-	-	-	-	-	-
	43	37	40	44	49	-	-	-	-	-	-	-	-
	42	36	39	42	47	-	-	-	-	-	-	-	-
	41	35	38	41	45	-	-	-	-	-	-	-	-
	40	35	37	40	43	49	-	-	-	-	-	-	-
	39	34	36	38	41	46	-	-	-	-	-	-	-
	38	33	35	37	40	44	49	-	-	-	-	-	-
	37	32	34	36	38	41	46	-	-	-	-	-	-
	36	32	33	35	37	39	43	49	-	-	-	-	-
	35	31	32	33	35	37	40	45	51	-	-	-	-
	34	30	31	32	34	36	38	42	47	-	-	-	-
	33	29	30	31	33	34	36	39	43	49	-	-	-
	32	29	29	30	31	33	35	37	40	44	51	-	-
	31	28	29	29	30	31	33	35	37	40	45	-	-
	30	27	28	28	29	30	31	33	35	37	40	45	-
29	26	27	27	28	29	30	31	33	35	37	40	-	
28	26	26	27	27	28	29	29	31	32	34	36	-	
27	25	25	26	26	27	27	28	29	30	31	33	-	
26	24	24	25	25	26	26	27	27	28	29	30	-	
25	22	23	24	24	24	25	25	26	27	27	28	-	
24	21	22	22	23	23	24	24	25	25	26	26	-	
23	20	20	21	22	22	23	23	24	24	24	25	-	
22	19	19	20	20	21	21	22	22	23	23	24	-	
21	18	18	19	19	20	20	21	21	22	22	23	-	
20	16	17	17	18	19	19	20	20	21	21	21	-	

Figura 3 Tabella di Steadman. "Methods to calculate the heat index as an exposure metric in environmental health research". Anderson GB1, Bell ML, Peng RD.

⁹ Servizio Meteorologico statunitense.

La temperatura apparente di Steadman è calcolabile per determinate combinazioni di temperatura e umidità che, appunto, Steadman ha racchiuso in due tabelle, le cui righe corrispondono ai diversi valori di temperatura. Le colonne, invece, nella prima tabella contengono i valori di umidità relativa (figura3), nella seconda i valori della temperatura al punto di dew point (figura4).

		Dew point temperature (°C)															
		0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
Temperature (°C)	50	45	45	46	46	47	47	48	50	52	-	-	-	-	-	-	-
	48	43	44	44	45	45	45	46	48	49	51	-	-	-	-	-	-
	46	42	42	42	43	44	44	45	46	47	49	51	-	-	-	-	-
	44	40	40	41	41	42	42	43	44	45	47	49	52	-	-	-	-
	42	38	38	39	39	40	40	41	42	43	45	47	49	52	-	-	-
	40	36	37	37	38	38	39	39	40	41	43	45	47	49	52	-	-
	38	35	35	35	36	36	37	37	38	39	41	42	44	46	49	52	-
	36	33	33	34	34	34	35	35	36	37	38	39	41	43	45	48	-
	34	32	32	32	33	33	33	33	34	35	36	37	38	40	42	45	-
	32	30	30	30	31	31	31	31	32	33	33	34	36	37	39	41	50
	30	28	28	28	29	29	29	30	30	31	31	32	33	35	36	38	45
	28	26	27	27	27	27	27	28	28	29	29	30	31	32	33	36	-
	26	24	25	25	25	25	25	26	26	26	27	27	28	29	30	-	-
	24	22	23	23	23	23	24	24	24	24	25	25	26	26	-	-	-
	22	20	20	21	21	21	22	22	22	22	23	23	24	-	-	-	-
	20	18	18	18	19	19	19	20	20	21	21	21	-	-	-	-	-

Figura 4 Tabella di Steadman. “Methods to calculate the heat index as an exposure metric in environmental health research”. Anderson GB1, Bell ML, Peng RD.

Le tabelle racchiudono valori di temperatura e umidità tipici degli Stati Uniti d’America, in quanto l’obiettivo era quello di rappresentare al meglio tutte le probabili condizioni meteorologiche di caldo estremo del territorio statunitense.

Le differenze tra i ventuno algoritmi riguardano i parametri che vengono utilizzati. In alcuni si utilizzano semplicemente i singoli termini di temperatura e umidità, in altri i parametri vengono utilizzati come termini esponenziali, in altri ancora sono dei fattori di correzione per determinate condizioni climatiche.

Il NWS usa un proprio algoritmo per calcolare l’Heat index, ovvero il seguente (11):

$$\begin{aligned}
 \text{Heat Index (HI)} &= -42,379 + 2,04901523(T_f) + 10,14333127(RH) \\
 &- 0,22475541(T_f)(RH) - (6,83783 * 10^{-3})(T_f^2) \\
 &- (5,481717 * 10^{-2})RH^2 + (1,22874 * 10^{-3})(T_f^2)RH \\
 &+ (8,5282 * 10^{-4})(T_f)(RH^2) - (1,99 * 10^{-6})(T_f^2)(RH^2)
 \end{aligned}$$

T_f = temperatura dell’aria di Fahrenheit

RH = umidità relativa

		Temperatura (°C)																	
		26,7	27,8	28,9	30,0	31,1	32,2	33,3	34,4	35,6	36,7	37,8	38,9	40,0	41,1	42,2	43,3		
Umidità relativa (%)	40	26,7	27,2	28,3	29,4	31,1	32,2	34,4	36,1	38,3	40,6	42,8	45,6	48,3	51,1	54,4	57,8		
	45	26,7	27,8	28,9	30,6	31,7	33,9	35,6	37,8	40,0	42,8	45,6	48,3	51,1	54,4	58,3			
	50	27,2	28,3	29,4	31,1	32,8	35,0	37,2	39,4	42,2	45,0	47,8	51,1	55,0	58,3				
	55	27,2	28,9	30,0	31,7	33,9	36,1	38,3	41,1	44,4	47,2	51,1	54,4	58,3					
	60	27,8	28,9	31,1	32,8	35,0	37,8	40,6	43,3	46,7	50,6	53,9	58,3						
	65	27,8	29,4	31,7	33,9	36,7	39,4	42,2	45,6	49,4	53,3	57,8							
	70	28,3	30,0	32,2	35,0	37,8	40,6	44,4	48,3	52,2	56,7								
	75	28,9	31,1	33,3	36,1	39,4	42,8	46,7	51,1	55,6									
	80	28,9	31,7	34,4	37,8	41,1	45,0	49,4	53,9										
	85	29,4	32,2	35,6	38,9	43,3	47,2	52,2	57,2										
	90	30,0	32,8	36,7	40,6	45,0	50,0	55,0											
	95	30,0	33,9	37,8	42,2	47,2	52,8												
	100	30,6	35,0	39,4	44,4	49,4	55,6												

Figura 5 Tabella dei valori possibili di Heat Index, ottenuta dalla tabella ufficiale pubblicata sul sito del National Weather Service statunitense.

I valori di Heat Index vengono considerati solo se l'umidità relativa è pari o superiore al 40%, altrimenti la temperatura dell'aria viene considerata l'effettivo valore di Heat Index.

Secondo G. Brooke Anderson, Michelle L. Bell e Roger D. Peng, autori dell'articolo "Methods to Calculate the Heat Index as an Exposure Metric in Environmental Health Research", risulta complicato determinare quale sia l'algoritmo più adatto per il calcolo dell'Heat Index dato che la maggior parte di essi produce valori simili a quelli della temperatura apparente di Steadman. Inoltre, i valori ottenuti dai diversi algoritmi sono correlati tra loro. (24)

Il valore soglia oltre al quale si avverte disagio termico per l'Heat Index è di 90°F, corrispondenti ai 32,2°C.

3.3.4 Net Effective Temperature (NET)

È un indice monitorato dall'Hong Kong Observatory, China e viene utilizzato anche dall'Instituto Português do Mar e da Atmosfera.

Le variabili meteorologiche considerate sono temperatura, velocità del vento e umidità relativa.

Quest'indice viene calcolato tramite la seguente formula:

$$NET = 37 - \frac{37 - T}{0,68 - 0,0014(RH) + \frac{1}{1,76 + 1,4v^{0,75}}} - 0,29T(1 - 0,01(RH))$$

T = temperatura dell'aria (°C)

v = velocità del vento (m/s)

RH = relative humidity (%)

Il pericolo viene segnalato quando la NET supera il 97,5° percentile dei dati di un periodo prescelto.

Questo indice può essere utilizzato sia durante il periodo estivo sia invernale. L'allerta nel periodo invernale viene attivata quando i valori di NET sono inferiori al 2,5° percentile di tutti i dati disponibili. (11)

Come affermato da Y. K. Leung, K. M. Yip e K.H. Yeung nell' articolo "Relationship between thermal index and mortality in Hong Kong" quando la NET supera i 26°C le morti dovute a colpo di calore aumentano. (25)

4 Dati impiegati nella tesi: Climate Network®

Per lo svolgimento di questo studio sono stati utilizzati i dati di temperatura, umidità relativa e velocità del vento, i quali sono stati rilevati dalle stazioni appartenenti a Climate Network®.

Climate Network® è la rete nazionale di stazioni meteorologiche gestita da Fondazione Osservatorio Meteorologico Milano Duomo (Fondazione OMD). La rete è composta da circa cinquanta stazioni, otto delle quali si concentrano nella città di Milano e circa una ventina nell'area metropolitana milanese. Le stazioni installate sono dotate del sensore Vaisala Weather Transmitter WXT520 che rileva le seguenti variabili meteorologiche: velocità e direzione del vento (1), precipitazioni (2), pressione (3), temperatura e umidità relativa¹⁰ (4). (26)

I sensori che rilevano la velocità e la direzione del vento sono dei trasduttori ultrasonici posizionati su un piano orizzontale ed equidistanti l'uno dall'altro. La misurazione avviene calcolando l'intervallo di tempo che impiega l'ultrasuono a spostarsi da un trasduttore agli altri due.

Per le precipitazioni, invece, è presente un sensore piezoelettrico al di sopra del quale si trova una copertura d'acciaio. Il segnale proveniente dall'impatto delle singole gocce di pioggia permette di individuare il volume di pioggia caduta durante l'evento.

Il sensore è in grado di:

- rilevare la quantità di pioggia caduta in tempo reale e quella accumulata,
- distinguere la pioggia dalla grandine,
- indicare l'intensità dell'evento precipitativo.

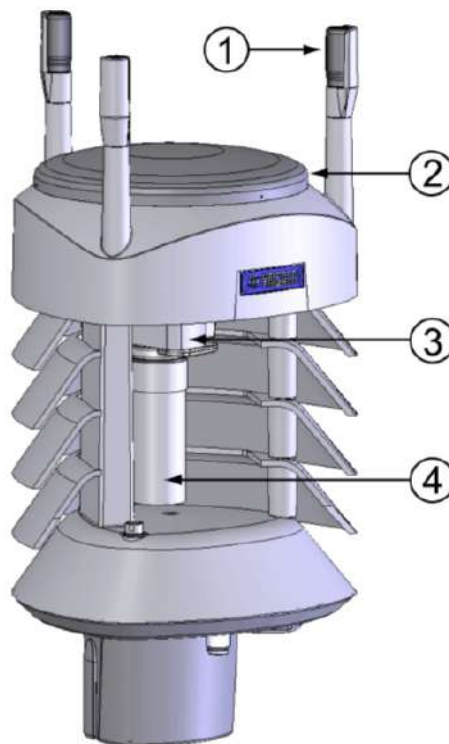


Figura 6 Stazione meteorologica Vaisala Weather Transmitter WXT520. (26)

¹⁰ Umidità relativa: è il rapporto tra la densità di vapore e la densità di vapore saturo alla stessa temperatura.

Per misurare temperatura, umidità e pressione è presente una singola unità dotata di tre sensori (THERMOCAP®, HUMICAP®, BAROCAP®).

Queste stazioni, installate in ambito urbano alla sommità dell'Urban Canopy layer¹¹ sono alimentate a pannelli fotovoltaici e non presentano parti mobili per garantirne la massima precisione. Per quest'ultimo motivo sono state posizionate su tetti e terrazzi lontane da eventuali fonti di disturbo. Regolarmente vengono sottoposte a manutenzione e taratura.

I dati vengono raccolti periodicamente attraverso un collegamento automatico. Successivamente sono sottoposti a una validazione giornaliera effettuata da parte dei meteorologi. Oltre ad essere dotati di tracciabilità e della loro incertezza, ogni dato è collegato al corrispettivo metadato¹². (27)

¹¹ L'urban canopy layer è lo strato atmosferico che si trova tra la superficie dell'asfalto e la sommità degli edifici.

¹² un metadato è un'informazione che descrive un insieme di dati, solitamente queste informazioni sono fornite dal produttore. Esempi di metadato sono: il nome della stazione, le coordinate, la quota, caratteristiche di posizionamento, ecc..

5 Elaborazione e analisi degli indici biometeorologici

Per lo svolgimento di questo studio sono stati utilizzati i dati meteorologici della rete Climate Network®. Lo studio ha compreso il calcolo e l'analisi dei quattro indici biometeorologici: Humidex, Heat Index, Temperatura Apparente e Net Effective Temperature (NET). Gli indici sono stati calcolati per tutte e cinquanta le stazioni di Climate Network® per un periodo che va dal 2012 al 2019. Nell'elaborato è stato necessario focalizzarsi sui dati del quadriennio 2016-2019, in quanto alcune stazioni sono state installate proprio nel 2016.

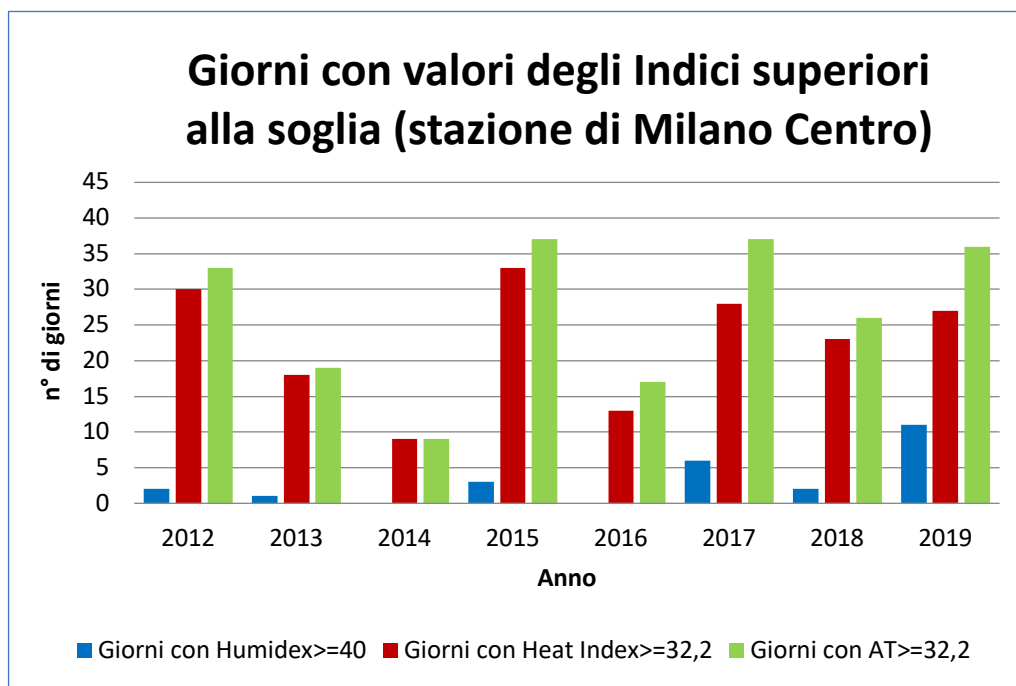
Per le ondate di calore sono stati calcolati gli indici Humidex, Heat Index e Temperatura Apparente per la stazione di Milano Centro del: 2003, 2015, 2017 e 2019.

Più precisamente sono stati utilizzati per lo studio i dati di temperatura dell'aria (°C), umidità relativa (%) e velocità del vento (m/s) della rete Climate Network®. In questo capitolo verranno confrontati gli indici biometeorologici Humidex, Temperatura Apparente e Heat Index, in modo particolare evidenziando le principali differenze tra diverse città d'Italia. Successivamente ci si concentrerà sulle ondate di calore più intense che hanno colpito la città di Milano. Infine, è stata svolta un'analisi dell'indice Net Effective Temperature per poter individuare quale fosse la città più calda d'Italia in un determinato periodo di tempo, tra quelle dotate di una stazione meteorologica appartenente a Climate Network.

5.1 Confronto fra Humidex, Heat Index e Temperatura Apparente

Humidex, Heat Index (HI) e Temperatura Apparente (TA) differiscono non solo per l'algoritmo di calcolo, ma anche per le variabili meteorologiche considerate; mentre Humidex e Heat Index prendono in considerazione temperatura dell'aria e umidità relativa; l'indice di Temperatura Apparente include, oltre a quelli già citati, anche la velocità del vento.

Durante lo studio, sono stati confrontati tutti i giorni con indice superiore al valore soglia di pericolo per la salute. La soglia di Temperatura Apparente risulta essere la stessa di quella dell'Heat Index, e corrisponde ai 32,2°C. Per l'Humidex, inizialmente, si è considerata la soglia di 40°C. Durante l'analisi dei dati della stazione di Milano Centro si è notato che il numero di giorni con Humidex $\geq 40^{\circ}\text{C}$ era nettamente inferiore rispetto a quelli al di sopra della soglia di Heat Index e di Temperatura apparente (Istogramma1).



Istogramma 1 Istogramma del numero di giorni con Humidex $\geq 40^{\circ}\text{C}$, Heat Index $\geq 32,2^{\circ}\text{C}$ e Temperatura Apparente $\geq 32,2^{\circ}\text{C}$. Dati della stazione di Milano Centro.

Trattandosi di indici studiati per aree geografiche differenti, le soglie prefissate si riferiscono a sintomi di discomfort termico diversi. Quindi è si è rivelato necessario riadattare le soglie per rendere maggiormente confrontabili i risultati ottenuti.

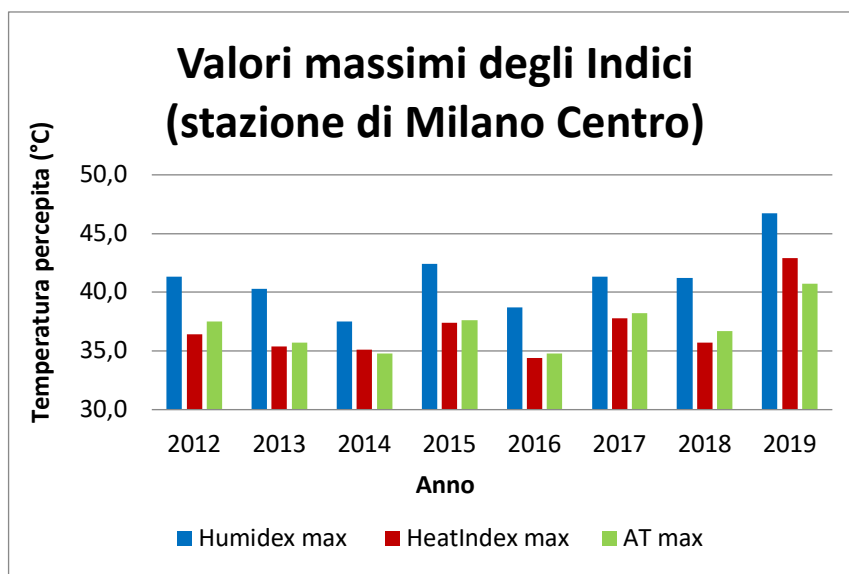
Subito si è pensato di aumentare la soglia degli altri due indici, visto che 32,2°C poteva essere in qualche modo una soglia troppo cautelativa rispetto a quella utilizzata, invece, per l'Humidex. Decidendo di alzare la soglia di questi, però, il numero di giorni con valore sopra la soglia si azzerava nella maggior parte delle stazioni. Per questo motivo si è deciso di abbassare la soglia dell'Humidex a 35°C. Infatti, come si vede dall'Istogramma 2, rispetto all'Istogramma 1, qui gli indici sono maggiormente confrontabili.



Istogramma 2 Grafico del numero di giorni con Humidex ≥ 35°C, Heat Index ≥ 32,2°C e Temperatura Apparente ≥ 32,2°C. Dati della stazione di Milano Centro.

Nonostante Heat Index e Temperatura Apparente considerino variabili meteorologiche diverse, i valori che si ricavano sono spesso molto simili tra loro. Ciò è dovuto al fatto che, come già detto, questi due indici derivano dalla stessa formula e spesso il contributo del vento è trascurabile a Milano.

Di seguito viene riportato il grafico che evidenzia la somiglianza tra HI e TA riguardante la stazione meteorologica di Milano Centro.



Istogramma 3 Istogramma dei valori massimi dei tre indici dal 2012 al 2019. Stazione meteorologica Milano Centro

Osservando il grafico si nota come l'Humidex assuma valori decisamente superiori rispetto agli altri due indici. Questo perché la velocità del vento, nella TA, abbassa notevolmente la temperatura percepita dal corpo umano, mentre l'Heat Index ha dei parametri negativi che abbassano la temperatura percepita. Va ricordato, inoltre, che Temperatura Apparente e Heat Index derivano dalla stessa formula. La differenza sostanziale tra Humidex e Heat Index riguarda i parametri considerati, infatti nella formula per l'HI ci sono diversi termini di correzione negativi rispetto a quella dell'Humidex. Inoltre come già detto in precedenza, l'Heat Index assume valori differenti dalla temperatura dell'aria solo nel caso in cui l'umidità relativa supera il 40%.

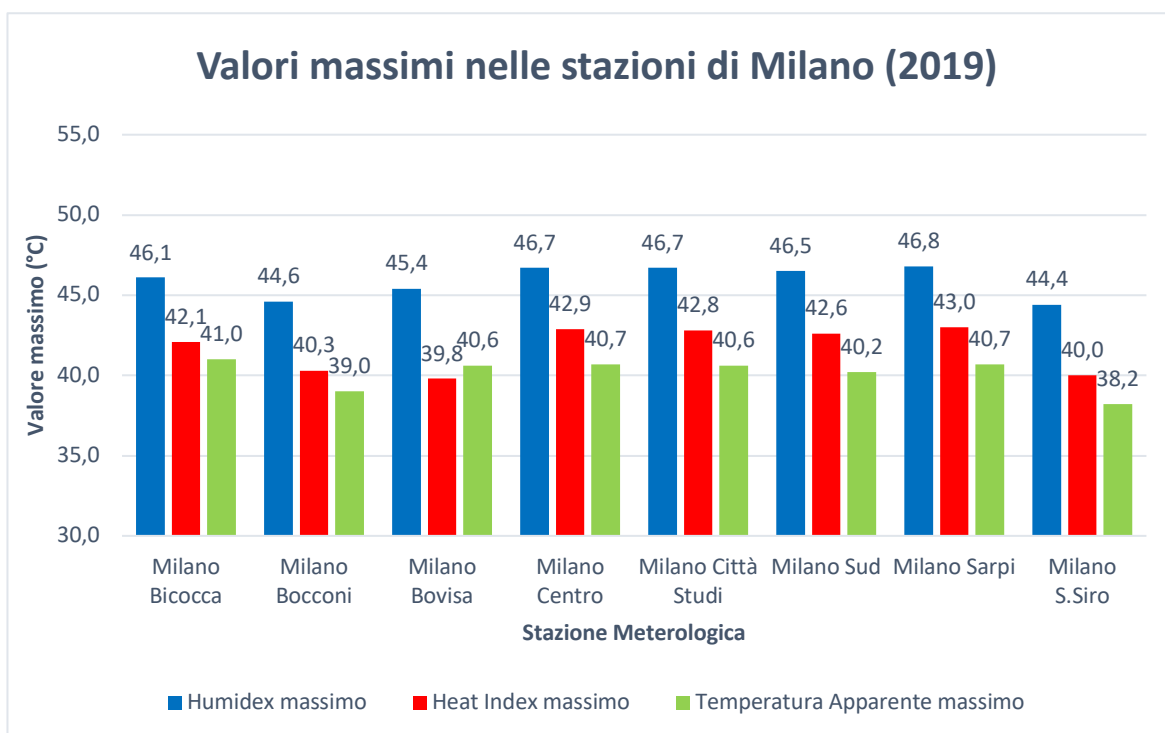
Analizzando i dati di tutte le stazioni di Milano¹³ sono state riscontrate differenze, talvolta anche importanti, tra i valori dei differenti indici.

Sono stati confrontati i dati dal 2016 ad oggi¹⁴, e la differenza che si nota è che i valori di Humidex sono sempre superiori rispetto agli altri due. Heat Index e Temperatura Apparente non risultano essere mai uguali ma comunque molto simili tra loro.

¹³ Le stazioni di Milano della Climate Network sono: Milano Bicocca, Milano Bovisa, Milano Bocconi, Milano Città Studi, Milano Centro, Milano San Siro, Milano Sud e Milano Sarpi.

¹⁴ L'analisi è stata svolta dal 2016, in quanto i dati della stazione di Milano Sarpi sono disponibili dal 2016.

Per sottolineare quanto detto nei capitoli precedenti, riguardanti l'isola di calore, sono state confrontate le otto stazioni di Milano. Ciò che ne è risultato è che pur essendo posizionate nella stessa città, queste presentino dei valori diversi. Ad esempio, per quanto riguarda l'Humidex, Milano Centro e Milano Città Studi hanno raggiunto un valore pari a 46,7°C mentre nella stazione di Milano San Siro si sono superati appena i 44°C¹⁵. Anche per Heat Index e Temperatura Apparente è stata Milano San Siro la stazione che ha rilevato una temperatura percepita inferiore rispetto alle altre.



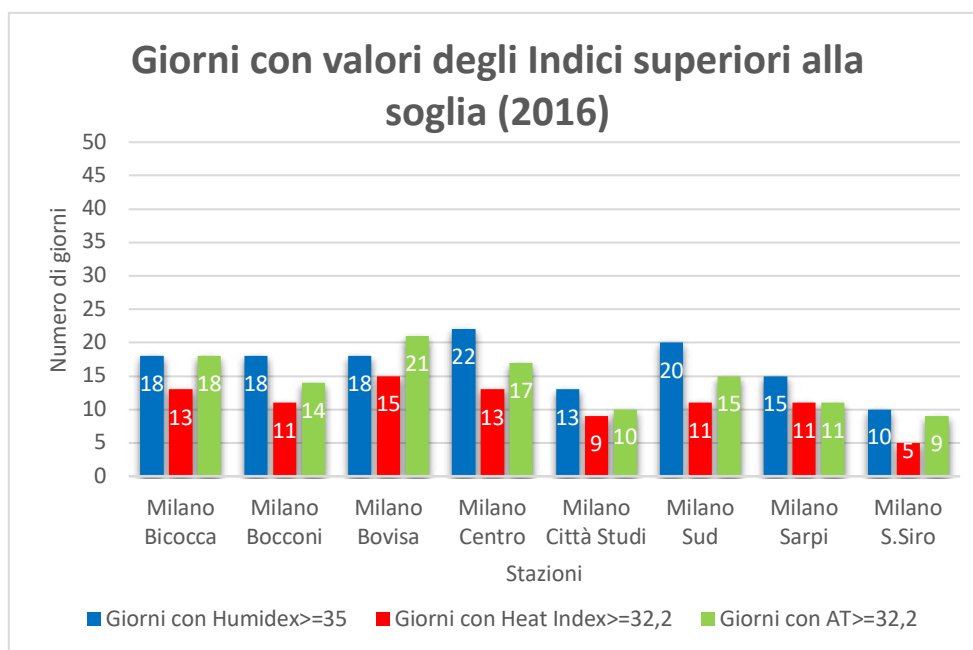
Istogramma 4 Istogramma dei valori massimi dei tre indici delle 8 stazioni di Milano registrati nel 2019.

I seguenti istogrammi (istogramma 5 e 6), invece, mostrano le differenze tra il numero di giorni con indice superiore alla soglia per i differenti indici nel 2016 e nel 2019. Sono state scelte queste due annate perché hanno valori estremamente differenti e nonostante il 2016 abbia dei valori inferiori la differenza tra le stazioni è comunque evidente.

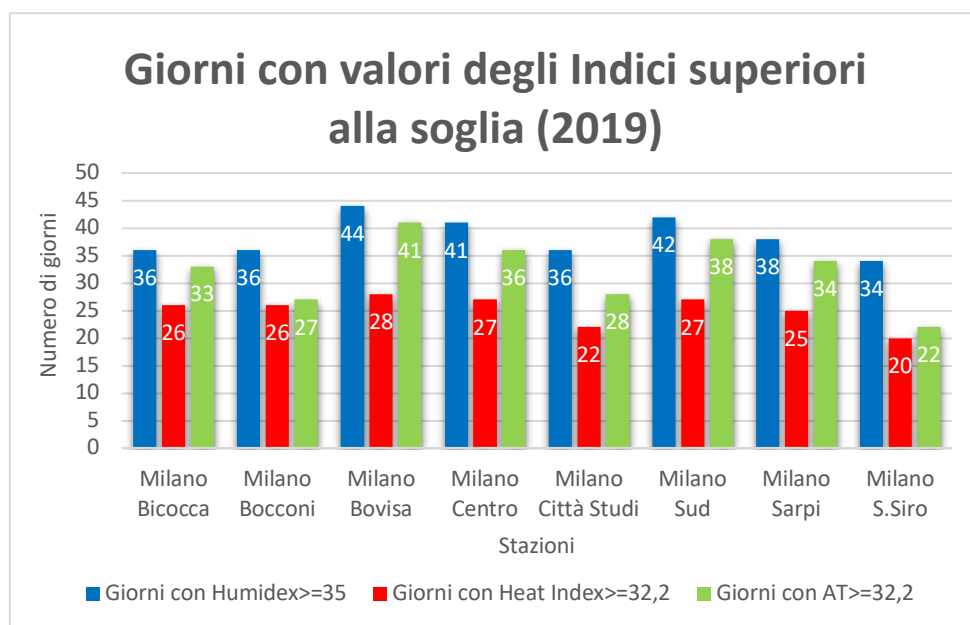
In entrambi i grafici e per tutti e tre gli indici risulta essere Milano San Siro la stazione meno soggetta al caldo estivo. Le stazioni più colpite risultano essere Milano Bovisa, Milano Centro e Milano Sud. Queste stazioni sono caratterizzate da scarsa ventilazione e da

¹⁵ Dati riferiti all'anno 2019.

un'elevata umidità. Anche Milano San Siro presenta un'elevata umidità ma rispetto alle altre è interessata da un clima leggermente più ventilato, e in generale da temperature più basse.



Istogramma 5 Istogramma dei giorni con indice superiore al valore soglia nel 2016 nelle stazioni meteorologiche milanesi



Istogramma 6 Istogramma dei giorni con indice superiore al valore soglia nel 2019 nelle stazioni meteorologiche milanesi.

I risultati si sono rivelati congrui alla posizione della stazione nella città. Infatti, la stazione di Milano San Siro è posizionata ai limiti del Comune di Milano e nei pressi di un'area verde quindi anche questo influisce sulle temperature percepite.

5.1.1 Confronto tra diverse città italiane

Il confronto tra i tre indici è stato poi effettuato tra diverse città d'Italia. In particolare, sono stati analizzati i dati delle città di Milano¹⁶, Genova, Bologna, Firenze¹⁷, Roma¹⁸, Ancona, Napoli, Bari e Palermo per gli anni dal 2017 al 2019¹⁹. Sono state scelte queste nove città italiane per evidenziare come gli indici variano in condizioni climatiche differenti.

Si ricorda che sia Humidex che Heat Index prendono in considerazione solo temperatura e umidità relativa, mentre la Temperatura Apparente considera anche la velocità del vento.

Stazione	Anno	Mese	Giorno	Ora	Humidex max	T(°C)	UR(%)	VV(m/s)
Milano	2017	8	4	18,00	41,3	37,2	27,2	1,4
Genova		8	7	17,00	36,5	32,4	35,6	3,0
Bologna		8	3	16,00	43,8	40,1	22,4	3,4
Firenze		8	1	16,00	42,7	40,9	17,3	2,4
Roma		8	4	13,00	41,7	35,2	38,4	2,7
Ancona		8	9	15,00	40,3	33,0	46,2	2,4
Napoli		8	4	19,00	41,0	30,7	64,9	1,4
Bari		8	10	18,00	41,9	34,4	43,1	1,2
Palermo		7	24	14,00	41,4	35,9	34,0	2,7

Tabella 1 Tabella dei valori massimi di Humidex in nove città d'Italia nel 2017

Stazione	Anno	Mese	Giorno	Ora	Heat Index max	T(°C)	UR(%)	VV(m/s)
Milano	2017	8	4	17,00	37,8	37,8	24,4	1,4
Genova		8	1	18,00	32,6	32,6	27,5	1,6
Bologna		8	4	17,00	40,2	40,2	20,7	3,7
Firenze		8	1	16,00	40,9	40,9	17,3	2,4
Roma		8	2	13,00	38,1	38,1	17,8	1,5
Ancona		8	4	13,00	39,2	39,2	13,8	1,1
Napoli		8	1	15,00	35,6	35,6	33,3	1,9
Bari		7	24	14,00	37,5	37,5	19,6	2,8
Palermo		6	28	17,00	39,5	39,5	15,2	3,2

Tabella 2 Tabella dei valori massimi di Heat Index in nove città d'Italia nel 2017

Stazione	Anno	Mese	Giorno	Ora	TA max	T(°C)	UR(%)	VV(m/s)
Milano	2017	8	4	17,00	38,2	37,8	24,4	1,4
Genova		8	6	13,00	32,3	30,4	46,5	1,2
Bologna		8	3	16,00	39,2	40,1	22,4	3,4
Firenze		8	1	16,00	39,7	40,9	17,3	2,4
Roma		8	4	12,00	37,1	36,1	31,6	1,7
Ancona		8	4	13,00	37,6	39,2	13,8	1,1
Napoli		8	1	15,00	36,7	35,6	33,3	1,9
Bari		8	10	18,00	37,4	34,4	43,1	1,2
Palermo		7	24	11,00	36,9	37,2	26,3	2,6

Tabella 3 Tabella dei valori massimi di Temperatura Apparente in nove città d'Italia nel 2017

Nelle tabelle soprastanti possiamo notare che le città con indice massimo maggiore sono diverse tra i tre indici. Per l'Humidex è Bologna ad essere la città più calda del 2017.

¹⁶ Stazione meteorologica di Milano Centro.

¹⁷ Stazione meteorologica di Firenze Centro.

¹⁸ Stazione Meteorologica di Roma Mazzini.

¹⁹ Sono stati scelti questi tre anni perché per alcune stazioni sono state installate nel 2017.

Nonostante la città con temperatura dell'aria più elevata sia stata Firenze, l'umidità relativa, in questo caso, è stata determinante. Per Heat Index e Temperatura Apparente è Firenze la città che ha registrato le temperature percepite più elevate, questo perché si sono verificate temperature dell'aria già notevoli di per sé.

Tutte le città, a parte Genova, hanno raggiunto valori molto più elevati rispetto alle soglie prefissate diverse per ogni indice. A Genova non sono state registrate temperature dell'aria elevate e anche l'umidità relativa, tutto sommato, non ha raggiunto valori elevati.

Il 2019, come possiamo vedere dalle tabelle sottostanti, è stato l'anno in cui si sono raggiunti i valori più alti di tutti e tre gli anni. In questo caso tutti e tre gli indici concordano sul fatto che Milano sia la città più calda mentre Ancona registra i valori più bassi.

Stazione	Anno	Mese	Giorno	Ora	Humidex max (°C)	T(°C)	UR(%)	VV(m/s)
Milano	2019	6	27	19,00	46,7	36,7	45,8	1,8
Genova		6	29	17,00	42,1	34,5	43,2	0,9
Bologna		6	28	15,00	43,0	35,2	42,1	1,6
Firenze		6	28	16,00	44,9	37,8	34,7	3,0
Roma		8	10	14,00	41,9	35,8	36,0	1,9
Ancona		8	10	14,00	39,4	33,5	40,3	1,3
Napoli		8	11	16,00	43,8	33,9	52,7	1,8
Bari		8	8	15,00	41,7	31,9	58,6	2,3
Palermo		7	9	16,00	41,5	30,6	67,4	3,8

Tabella 4 Tabella dei valori massimi di Humidex di nove città d'Italia nel 2019

Stazione	Anno	Mese	Giorno	Ora	Heat Index max	T(°C)	UR(%)	VV(m/s)
Milano	2019	6	27	19,00	42,9	36,7	45,8	1,8
Genova		6	29	17,00	37,3	34,5	43,2	0,9
Bologna		6	27	16,00	38,7	38,7	22,4	1,4
Firenze		6	28	18,00	40,1	36,1	42,3	3,9
Roma		8	12	15,00	37,3	37,4	23,3	2,0
Ancona		8	12	14,00	35,8	35,8	26,6	1,3
Napoli		8	11	16,00	39,1	33,9	52,7	1,8
Bari		8	8	15,00	36,5	31,9	58,6	2,3
Palermo		7	9	16,00	35,8	30,6	67,4	3,8

Tabella 5 Tabella dei valori massimi di Heat Index in nove città d'Italia nel 2019

Stazione	Anno	Mese	Giorno	Ora	TA max	T(°C)	UR(%)	VV(m/s)
Milano	2019	6	27	19,00	40,7	36,7	45,8	1,8
Genova		6	29	17,00	37,7	34,5	43,2	0,9
Bologna		6	27	19,00	39,2	37,8	27,6	0,9
Firenze		6	28	16,00	39,2	37,8	34,7	3,0
Roma		8	10	13,00	37,6	35,7	34,6	1,1
Ancona		8	12	14,00	36,0	35,8	26,6	1,3
Napoli		8	11	16,00	37,8	33,9	52,7	1,8
Bari		8	8	16,00	36,6	34,8	36,5	1,3
Palermo		7	9	18,00	37,3	35,1	37,3	1,1

Tabella 6 Tabella dei valori massimi di Temperatura Apparente in nove città d'Italia nel 2019.

In conclusione, possiamo affermare che le temperature percepite più elevate sono state registrate nelle località lontane dal mare: ovvero Milano, Bologna, Firenze. Ciò è riconducibile oltre che a un'elevata umidità e anche a una scarsa ventilazione, tipiche del clima continentale.

Al contrario Napoli, Ancona, Genova, Bari, Palermo, nonostante l'elevata umidità, risultano essere più miti grazie all'azione del vento e, in certi casi, a temperature di partenza in generale più miti.

5.2 Focus sulle ondate di calore

Come già discusso nei capitoli precedenti, il 2003 è stato caratterizzato da forti ondate di calore che hanno interessato l'Europa intera e quindi anche l'Italia. Anche se non agli stessi livelli del 2003, le estati dell'ultimo decennio sono state soggette a questi eventi: in particolare 2015, 2017 e 2019.

Per il calcolo delle ondate di calore è stato utilizzato il CLINO 1971-2000 al posto di quelli ufficiali (1961-1990, 1981-2010), poiché il CLINO 1961-1990 viene utilizzato principalmente per valutare i cambiamenti climatici mentre quello 1981-2010 comprende i dati del 2003, anno soggetto ad analisi. Il CLINO 1971-2000, invece, rappresenta al meglio l'andamento climatico di questi ultimi anni.

Nella seguente analisi verranno considerate le ondate di calore che hanno interessato la città di Milano durante gli anni sopracitati. In particolare, si analizzeranno come variano gli indici Humidex, Heat Index e Temperatura Apparente. Successivamente verrà studiato il comportamento degli indici durante i giorni successivi all'ondata di caldo considerata.

Una delle ondate più violente e prolungate del 2003 è stata registrata tra il 2 e il 14 agosto.

Come si può notare dalla tabella i valori di tutti e tre gli indici sono stati particolarmente elevati durante l'ondata di caldo.

Questa ondata di calore è stata la più lunga tra quelle analizzate: è durata ben 13 giorni.

Durante i giorni successivi all'ondata, il 15 e il 16 agosto 2003, si nota che gli indici, nonostante tendano a calare, assumono dei valori piuttosto elevati. Infatti, l'Humidex non è sceso al di sotto

dei 39,5°, questo perché mentre la temperatura dell'aria tendeva a diminuire, l'umidità andava in direzione opposta.

2-14 agosto 2003		
Humidex max (°C)	HI max (°C)	TA max (°C)
43,9	39,1	39,3
15-16 agosto 2003		
Humidex max (°C)	HI max (°C)	TA max (°C)
39,5	34,5	35,8

Tabella 7 Tabella indicate i valori degli indici durante e dopo l'ondata di calore. Nella stazione di Milano Centro.

Durante questi due giorni è stata rilevata un'umidità relativa pari al 83,6%, verificatasi alle ore 6.00 del mattino del 16 agosto, con una temperatura dell'aria di 23,2°C. Heat Index e Temperatura Apparente, nonostante siano calati, sono rimasti comunque sopra la soglia del 32,2°C. Questo sottolinea il fatto che, pur essendo finita l'ondata di caldo, le temperature e l'umidità provocano ancora un forte disagio termico.

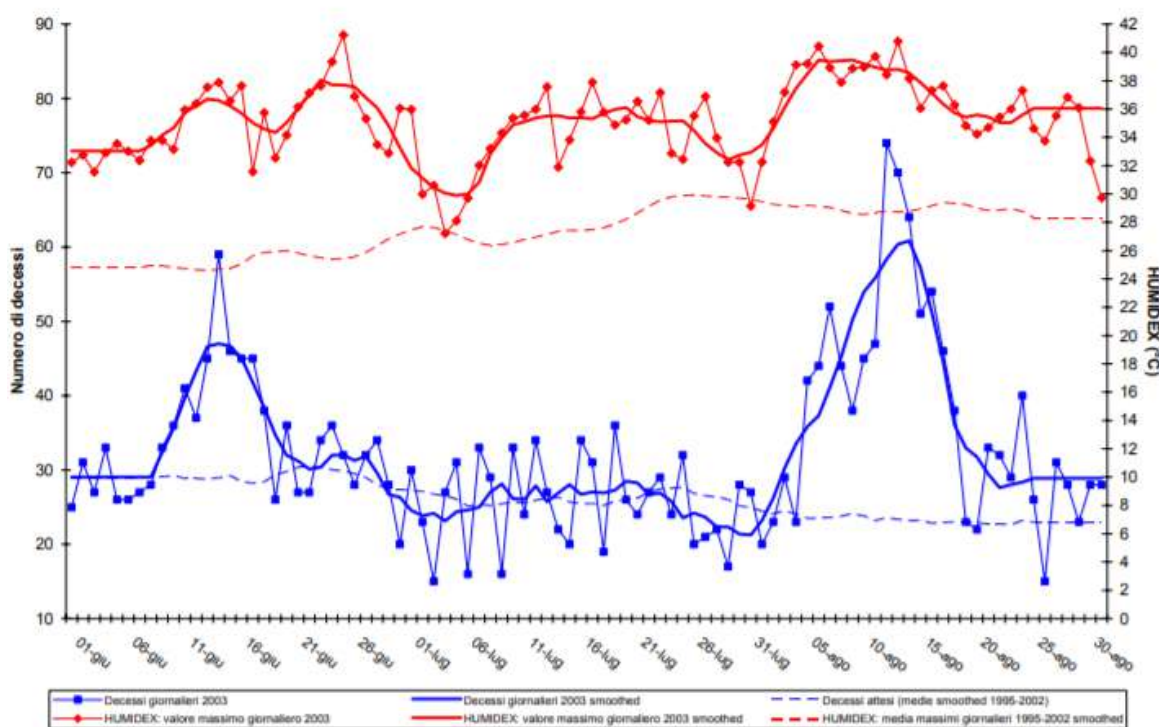


Grafico 1 Grafico Andamento mortalità del 2003 dal 1° giugno al 30 agosto nella città di Milano. (13)

Il grafico sopra riportato mostra l'andamento del tasso di mortalità di individui di età superiore ai 65 anni nel 2003 (13). Possiamo notare che in corrispondenza dell'ondata di calore analizzata si è riscontrato il picco massimo del tasso di mortalità di quell'estate. Inoltre, pur abbassandosi, ha mantenuto livelli sopra la media per diversi giorni anche dopo l'ondata di calore.

Anche nel 2015 si è verificata un'ondata di calore particolarmente duratura, ovvero quella tra il 13 e il 23 luglio. Ma nonostante la sua lunga durata, le temperature percepite non hanno eguagliato i valori dell'ondata del 2003.

13-23 luglio 2015		
Humidex max (°C)	HI max (°C)	TA max (°C)
40,0	36,6	36,6
24-25 luglio 2015		
Humidex max (°C)	HI max (°C)	TA max (°C)
37,0	32,9	33,2

Tabella 8 Tabella indicate i valori degli indici durante e dopo l'ondata di calore. Nella stazione di Milano Centro

Non è stata la prima ondata del 2015, bensì ci fu una breve ondata tra il 4 e il 7 luglio, appena cinque giorni prima di quella analizzata.

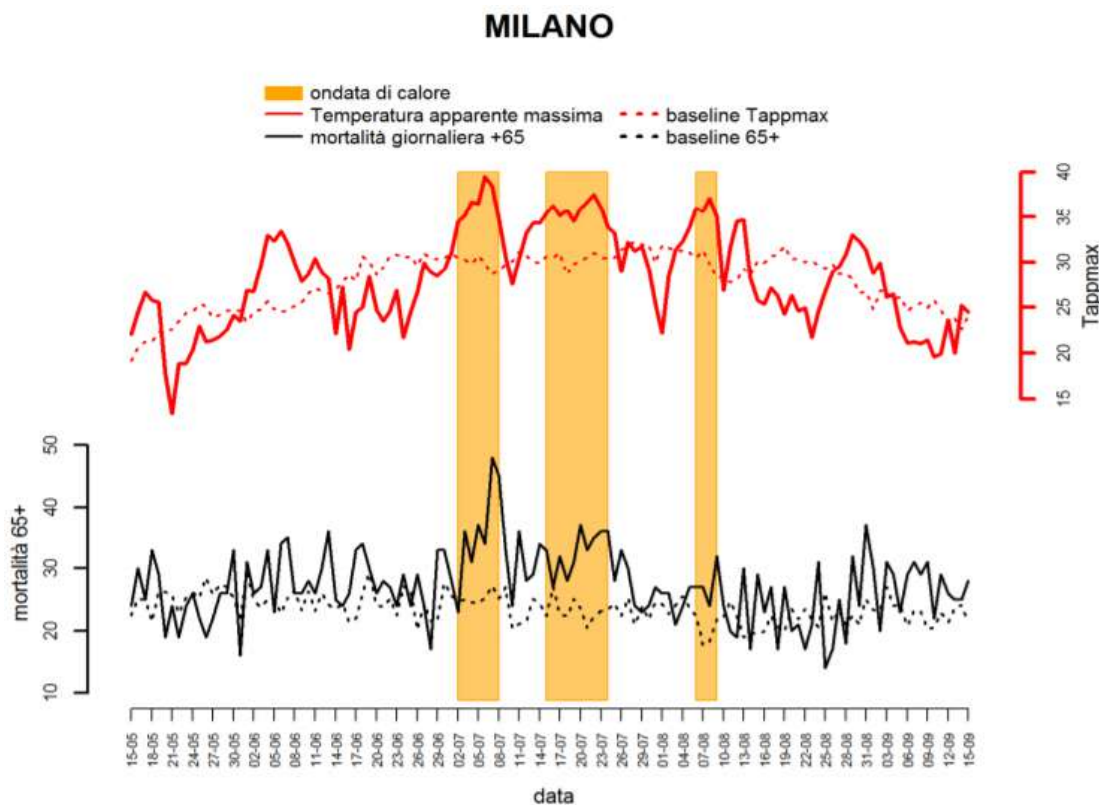


Grafico 2 Grafico andamento mortalità a Milano nel 2015 (16)

Anche nel 2015, si sono verificati degli aumenti del tasso di mortalità di persone con più di 65 anni di età (16). Durante l'ondata di caldo studiata non si è raggiunto il picco massimo, però l'aumento del tasso di mortalità rispetto alla media è perdurato per più giorni.

Il 2017 è stato caratterizzato da 5 ondate di calore, tra di queste la più violenta è avvenuta dal 1 al 5 agosto. A differenza delle due ondate precedentemente analizzate, essa non è stata particolarmente duratura, ciononostante i massimi di Humidex hanno superato i 41°C (41,3°), l'Heat Index ha sfiorato i 38°C mentre la Temperatura apparente ha raggiunto i 38,2°C.

1-5 agosto 2017		
Humidex max (°C)	HI max (°C)	TA max (°C)
41,3	37,8	38,2
6-7 agosto 2017		
Humidex max (°C)	HI max (°C)	TA max (°C)
37,3	32,1	33,4

Tabella 9 Tabella indicate i valori degli indici durante e dopo l'ondata di calore. Nella stazione di Milano Centro

Nel 2017 nonostante gli indici abbiano superato la soglia di disagio, non sono stati rilevati significativi incrementi nei tassi di mortalità.

Senza ombra di dubbio l'ondata di caldo del 2003 dal 2 al 14 agosto è stata l'ondata più duratura degli ultimi anni; mentre tra le ondate con le temperature più alte vi è quella registrata tra il 25 e il 28 giugno 2019, dove rispettivamente i tre indici, Humidex, Heat Index e Temperatura Apparente hanno toccato i 46,7°, 42,9° e i 40,7°.

Nonostante le ondate di calore del 2019 siano state solo quattro rispetto alle sette del 2003, esse si sono verificate in periodi ravvicinati

25-28 giugno 2019			22-26 luglio 2019		
Humidex max (°C)	HI max (°C)	TA max (°C)	Humidex max (°C)	HI max (°C)	TA max (°C)
46,7	42,9	40,7	42,7	38,0	37,9
8-9 luglio 2019			27-28 luglio 2019		
Humidex max (°C)	HI max (°C)	TA max (°C)	Humidex max (°C)	HI max (°C)	TA max (°C)
35,5	33,4	32,6	35,4	30,3	31,2

Tabella 10 Tabella indicate i valori degli indici durante e dopo l'ondata di calore. Nella stazione di Milano Centro.

tra loro: la prima tra il 25 e il 28 giugno, la seconda tra il 30 giugno e il 2 luglio, la terza tra il 5 e il 7 luglio e infine l'ultima tra il 22 e il 26 luglio. Due di queste quattro ondate sono state particolarmente intense. Durante la prima ondata di caldo i valori dei tre indici hanno superato quelli del 2003. Nonostante ciò il livello del tasso di mortalità non ha avuto delle variazioni significative.

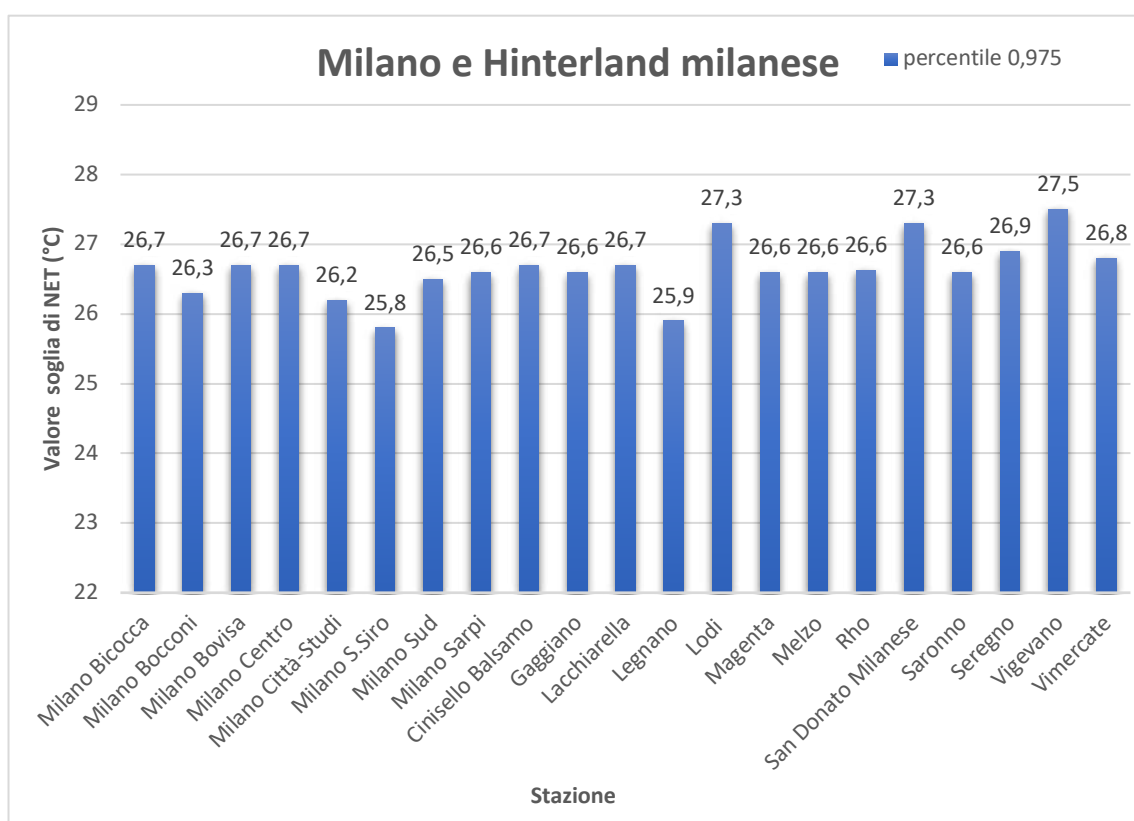
5.3 *Indice di Net Effective Temperature applicato alla Climate Network®*

L'indice NET, o Net Effective Temperature, è stato fondamentale per determinare quali tra le stazioni della Climate Network® fosse maggiormente interessata da temperature percepite elevate. A differenza delle altre analisi, questa ha interessato tutte e cinquanta le stazioni della rete meteorologica.

Si ricorda che la soglia di questo indice, a differenza di quelli precedentemente analizzati, è pari al 97,5-esimo percentile dei dati storici a disposizione e non è un valore prefissato.

Per lo svolgimento di questo studio si è deciso di suddividere le stazioni di Milano e dell'hinterland milanese da quelle del resto d'Italia.

Nel caso delle stazioni milanesi e dell'hinterland il percentile si basa sui dati orari estivi di 4 anni di raccolta dati (dal 2016 al 2019).

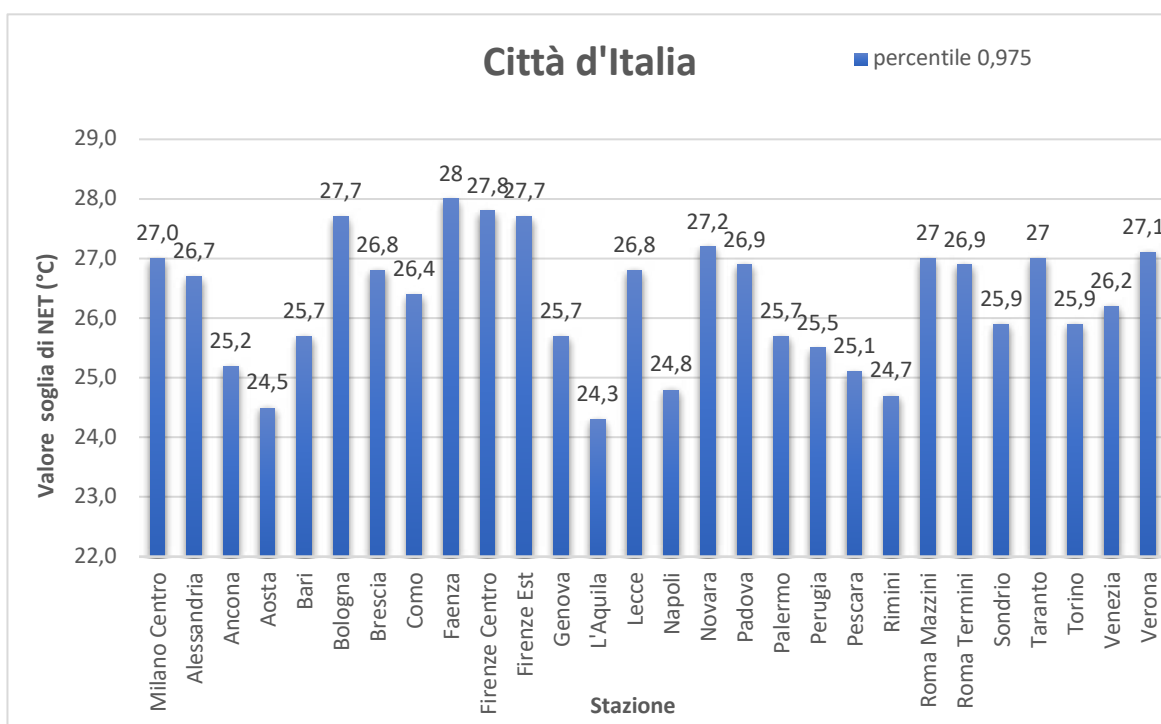


Istogramma 7 Istogramma NET stazioni di Milano e dell'hinterland (2016-2019).

In questo caso la stazione con valore di NET più elevato è quella di Vigevano; il valore più basso appartiene alla stazione di Milano San Siro.

Vigevano è una città particolarmente umida e con scarsa ventilazione quindi ci si possono aspettare dei valori di NET elevati.

Nella prima parte dell'istogramma 7 sono raccolte tutte le stazioni di Milano, e anche in questo caso si evidenzia come l'eterogeneità del tessuto urbano influenzi i valori dell'indice.



Istogramma 8 Istogramma NET stazioni del resto d'Italia (2017-2019).

Per quanto riguarda, invece, le altre stazioni il percentile si basa sui dati estivi di tre anni di dati (dal 2017 al 2019).

Nel grafico notiamo che L'Aquila è la stazione con il valore di NET più basso. Faenza, invece, con un NET di 28°C è la città più calda d'Italia.

Le città di mare e di montagna hanno mediamente dei valori più bassi di NET rispetto a città come Firenze, Milano e Bologna che sono interessate da clima continentale.

6 Conclusioni

L'analisi dei dati ha evidenziato delle differenze tra gli indici di Humidex, Heat Index e Temperatura Apparente: per esempio considerando la stazione di Milano Centro nel 2019, che a Milano è stata una delle estati più calde di sempre, seconda solo a quella del 2003, ha registrato valori di Humidex pari a 46,7°C, mentre l'Heat Index non ha raggiunto i 43°, e infine la Temperatura Apparente si è arrestata al di sotto dei 41°C. Ciò è dovuto al fatto che, oltre ad avere una formula di calcolo diversa, considerano variabili meteorologiche differenti: Humidex e Heat Index utilizzano temperatura dell'aria e umidità relativa, mentre la Temperatura Apparente tiene conto anche della velocità del vento.

Humidex e Heat Index pur considerando le stesse variabili meteorologiche hanno rilevato temperature percepite diverse, superando talvolta 6°C di differenza.

L'Heat Index ha spesso avuto, invece, risultati simili a quelli della Temperatura Apparente, il divario più volte non ha raggiunto il grado. La motivazione principale riguarda il fatto che questi due indici derivano dalla stessa formula.

Lo studio ha evidenziato come le stazioni di Milano registrino valori differenti di temperatura, umidità e velocità del vento a seconda della zona in cui si trovano. Le stazioni di Milano Città Studi, Milano Sud e Centro hanno raggiunto le temperature percepite più elevate, ad esempio nel 2019 l'Humidex ha superato i 46,5°C. La stazione di Milano San Siro, essendo vicino ad un'area verde e spesso soggetta a maggior ventilazione, ha registrato temperature percepite leggermente inferiori. Considerando sempre l'Humidex del 2019, i valori massimi non hanno oltrepassato i 44,4°C. In una stessa giornata il divario tra le diverse stazioni ha superato i 2°C per questo indice.

Prendendo in considerazione, invece il numero di giorni con indice sopra la soglia di discomfort sono risultate questa volta Milano Bovisa, Milano Sud e Centro le stazioni più calde. Ad esempio a Milano Bovisa, nel 2019, sono stati 44 i giorni con Humidex sopra la soglia, mentre a Milano San Siro sono stati solamente 34, valore più basso registrato nella città di Milano. Nonostante a Milano Città Studi si sia verificato un valore massimo di Humidex superiore a quello di Milano Bovisa, sono stati “solo” 36 i giorni con Humidex superiore alla soglia.

Confrontando, invece, le stazioni di Milano Centro, Ancona, Bari, Bologna, Firenze, Genova, Napoli, Palermo e Roma, si è potuto notare come le città di mare, pur avendo

temperature e umidità elevate, siano caratterizzate da temperature percepite non troppo alte. Ad Ancona, sia nel 2017 che nel 2019, i tre indici non hanno mai raggiunto valori massimi di 40°C; per le altre città costiere solo l'indice Humidex, che ricordiamo non prende in considerazione la ventilazione, ha superato i 40°C.

Le città sopracitate infatti sono piuttosto ventilate, e per questo motivo non raggiungono mai i valori di Milano, Firenze o Bologna, le quali sono caratterizzate da un clima continentale umido e soggette a scarsa ventilazione. Ad esempio, Bologna nel 2017 ha sfiorato i 44°C di temperatura percepita per quanto riguarda l'Humidex; mentre per Heat Index e Temperatura Apparente è stata Firenze a raggiungere i rispettivi valori massimi di 40,9°C e 39,7°C, sempre nel 2017.

In seguito, lo studio si è concentrato sulle ondate di calore a Milano. L'andamento dei tassi di mortalità ha evidenziato come l'ondata del 2003 sia ancora oggi l'ondata più intensa, duratura e che ha provocato il maggior aumento del tasso di mortalità degli ultimi vent'anni. Durante l'estate del 2019, però, sono stati registrati i valori massimi di temperatura percepita degli ultimi anni. Questi valori si sono ottenuti per tutti e tre gli indici: Humidex ha raggiunto quasi i 47°C, Heat Index i 42,7°C e infine la Temperatura Apparente ha sfiorato i 41°C. L'estate più calda, dal 1897²⁰ ad oggi (28), rimane quella del 2003 seguita poi da quella del 2019. Nonostante ciò nel periodo estivo del 2019 non si è riscontrato un aumento significativo dei tassi di mortalità come accadde nel 2003. Questo potrebbe essere dovuto al fatto che il 2019 ha registrato:

- ondate di calore di durata massima di cinque giorni, mentre nel 2003 l'ondata più lunga è durata tredici giorni
- quattro ondate di calore, rispetto alle sette che hanno caratterizzato il 2003

Un altro fattore che potrebbe aver contribuito a ridurre la mortalità durante le ondate di calore è l'eventuale miglioramento del piano nazionale di prevenzione e allerta istituito da Protezione Civile e Ministero della Salute.

L'indice NET, infine, ha dimostrato che Faenza con i suoi 28°C è la stazione con le temperature percepite più elevate tra tutte le stazioni di Climate Network®.

Anche questo indice ha evidenziato le differenze tra le otto stazioni di Milano, e sempre Milano San Siro si è dimostrata la stazione meno calda, rilevando una NET pari ai 25,8°C.

²⁰ Anno dal quale sono disponibili i dati in formato digitalizzato della stazione di Milano Centro.

Milano Bicocca, Bovisa e Centro sono le stazioni caratterizzate dalle temperature percepite più calde, infatti hanno raggiunto i 26,7°C. Tra queste e Milano San Siro vi è una differenza di quasi un grado.

È possibile, quindi, definire quale sia l'indice più corretto da utilizzare?

Possiamo affermare che non è possibile individuare quale sia il miglior indice da utilizzare in assoluto, anche perché ogni località ha caratteristiche climatiche differenti. Sicuramente nelle città di mare o caratterizzate da una certa ventilazione, sarebbe più appropriato l'utilizzo dell'indice di Temperatura Apparente, nella cui formula è presente il dato della velocità del vento; mentre nelle città con clima continentale Humidex o Heat Index possono essere più utili. L'Heat Index, però, ha dei limiti rispetto all'Humidex, perché la sua formula è applicabile solo nel caso in cui l'umidità relativa sia superiore al 40%, valore peraltro abbastanza elevato. Al di sotto di quella percentuale, l'Heat Index risulta essere pari alla temperatura dell'aria, sottintendendo che livelli di umidità inferiore al 40% non abbiano alcuna influenza sulla temperatura percepita.

Come si è potuto notare gli indici biometeorologici, negli ultimi anni specialmente, stanno assumendo un ruolo fondamentale per la salvaguardia della salute della popolazione, soprattutto durante il periodo estivo. Potrebbe diventare necessario, quindi, l'introduzione di un regolamento che indichi quale indice utilizzare in base alla condizione climatica che caratterizza una città. In questo modo sarebbe possibile confrontare i dati di città aventi caratteristiche climatiche simili, cosa attualmente di difficile realizzazione.

Bibliografia e siti consultati

1. ARPA Emilia Romagna. Scomparsa delle api e ambiente le cause, i rischi, i rimedi. Nuove frontiere dei campi elettromagnetici. Etica e cambiamento climatico. 2008, p. 48-49.
2. European Environment Agency. European Environment Agency. [Online] <https://www.eea.europa.eu/publications/climate-impacts-and-vulnerability-2012>.
3. World Meteorological Organization. *www.wmo.int*. [Online] 2017. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4166.
4. IPCC. IPCC. <https://www.ipcc.ch/>. [Online] <https://www.ipcc.ch/sr15/>.
5. Lernia, Susanna Di. Fondazione Osservatorio Meteorologico Milano Duomo. <https://www.fondazioneomd.it>. [Online] 23 Maggio 2018. <https://www.fondazioneomd.it/single-post/2018/05/23/Cambiamento-climatico-i-rischi-per-la-salute>.
6. T.R. Oke, G. Mills, A. Christen e J.A. Voogt. *URBAN CLIMATES*. s.l. : Cambridge University Press, 2017.
7. Herrmann J., Matzarakis A. Mean radiant temperature in idealised urban canyons--examples from Freiburg Germany. 2012.
8. [Online] <https://www.infobuildenergia.it/approfondimenti/effetto-isola-calore-ridurre-surriscaldamento-urbano-392.html>.
9. Teodoro Georgiadis, CNR IBIMET, Bologna. Rebus(R). [Online] <https://www.rebus.site/pubblicazioni-e-strumenti.html>.
10. George Luber, Michael McGeehin. Climate Change and Extreme Heat Events.
11. World Meteorological Organization and World Health Organization. *Heatwaves and Health: Guidance on Warning-System Development*. Geneve : G.R. McGregor, P. Bessemoulin, K. Ebi and B. Menne, 2015.
12. M. Giuliacci, P. Corazzon, S. Abelli, L. Bertolani, L. Danieli, G. Dipierro, F. Galbiati, A. Giuliacci, D. Izzo, A. Perotto, D. Toscani, R. Salerno, A. Borroni, M, Bolasina. *Manuale di Meteorologia*. Milano : Alpha Test, 2016.

13. Luigi Bisanti, Antonio Russo, Mariangela Autelintano (Azienda Sanitaria Locale della città di Milano). *Rapporto sulla mortalità associata alle onde di calore verificatesi a Milano nell'estate del 2003*. Milano : s.n., 2003.
14. Conti, Susanna. Epicentro. <https://www.epicentro.iss.it/>. [Online] <https://www.epicentro.iss.it/mortalita/CALDO-MORTI>.
15. P. Michelozzi, F. K. de' Donato, A. M. Bargagli, D. D'Ippoliti, M. De Sario, C. Marino, P. Schifano, G. Cappai, M. Leone, U. Kirchmayer, M. Ventura, M. di Gennaro, M. Leonardi, F. Oleari, A. De Martino, C. A. Petrucci. Surveillance of Summer Mortality and Preparedness to Reduce the Health Impact of Heat Waves in Italy. 2010.
16. DEP Lazio, Centro di Competenza Nazionale Dipartimento della Protezione Civile, Ministero della salute, Centro Nazionale per la Prevenzione ed il Controllo delle Malattie. *Piano Operativo Nazionale per la Prevenzione degli effetti del Caldo sulla Salute. ONDATE DI CALORE ED EFFETTI SULLA SALUTE ESTATE 2015 SINTESI DEI RISULTATI*. 2015.
17. Jose Guillermo Cedeño Laurent, Augusta Williams, Youssef Oulhote, Antonella Zanobetti, Joseph G. Allen, John D. Spengler. Reduced cognitive function during a heat wave among residents of non-air-conditioned buildings: An observational study of young adults in the summer of 2016. 2016.
18. Pedriali, Dott.ssa Meri. [Online] <http://www.unife.it/medicina/ostetricia/studiare/minisiti/scienze-ostetriche-ginecologiche/scienze-infermieristiche-ostetrico-ginecologiche/materiale-dott-pedriali/temperatura%20corporea.pdf>.
19. Direzione generale della prevenzione sanitaria. Ministero della Salute. Microclima e benessere termico. [Online] 16 dicembre 2015. http://www.salute.gov.it/portale/temi/p2_6.jsp?lingua=italiano&id=4387&area=indor&menu=vuoto.
20. Unibo. Fisiopatologia della termoregolazione. [Online] http://amsacta.unibo.it/3067/124/41_fp_termoregolazione_I_ed_ebook.pdf.
21. Umberto Solimene, Angelico Brugnoli. *METEOROLOGIA E CLIMATOLOGIA MEDICA Tempo, Clima e Salute*. Milano : Mediamed Srl, 2000.

22. Ministero della Salute. I rischi per la salute. [Online] maggio 2016. <http://www.salute.gov.it/portale/caldo/dettaglioContenutiCaldo.jsp?lingua=italiano&id=4546&area=emergenzaCaldo&menu=vuoto>.
23. ARPA, Regione Lombardia . Disagio da Calore Humidex. *ARPA Lombardia* . [Online] <https://www.arpalombardia.it/siti/arpalombardia/meteo/previsionimeteo/humidex/Pagine/Humidex-info.aspx>.
24. G. Brooke Anderson, Michelle L. Bell, and Roger D. Peng. Methods to Calculate the Heat Index as an Exposure Metric in Environmental Health Research. *Environmental Health Perspectives* .
25. Y.K. Yeung, K.M. Yip, K.H. Yeung. Royal Meteorological Society. <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com>. [Online] <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/met.82>.
26. Vaisala Oyj. *User's guide. Vaisala Weather Transmitter WXT520*. Helsinki : s.n., 2012.
27. Fondazione OMD. Fondazione OMD Osservatorio Meteorologico Milano Duomo. <https://www.fondazioneomd.it/>. [Online] <https://www.fondazioneomd.it/climate-network>.
28. —. Estate 2019 a Milano: i nostri dati. *Fondazione Osservatorio Meteorologico Milano Duomo*. [Online] 12 settembre 2019. <https://www.fondazioneomd.it/single-post/2019/09/12/Estate-2019-a-Milano-i-nostri-dati>.
29. DEP Lazio, ASL Roma1, Regione Lazio, Ministero della Salute, Centro Nazionale Prevenzione e Controllo Malattie. *Risultati dei Sistemi di Allarme (HHWWS) e del Sistema di Sorveglianza della Mortalità Giornaliera (SiSMG) e degli accessi in pronto soccorso. Estate 2017 risultati* . 2017.
30. DEP Lazio, Ministero della Salute, Centro Nazionale Prevenzione e controllo Malattie, ASL ROMA1, Regione Lazio. *Sistema di sorveglianza della mortalità giornaliera-popolazione 65+ anni*. 2019.
31. Zhang Y., Du X., Shi Y. Effects of street canyon design on pedestrian thermal comfort in the hot-humid area of China. 2017, p. Abstract.

Appendice A

Città	15-31 Maggio			Giugno			Luglio			Agosto			Settembre							
	Osservati	Attesi	Var %	p-value	Osservati	Attesi	Var %	p-value	Osservati	Attesi	Var %	p-value	Osservati	Attesi	Var %	p-value				
BOZZANO	31	34	-9	0.590	72	61	18	0.195	65	63	3	0.804	66	63	5	0.712	25	27	-7	0.689
TORINO	299	297	1	0.908	539	522	3	0.464	750	532	41	<0.001	580	524	11	0.020	304	234	30	<0.001
MILANO	417	428	-3	0.590	847	737	15	<0.001	983	737	33	<0.001	743	682	9	0.025	408	343	19	0.001
BRESCIA	59	66	-11	0.362	115	123	-7	0.456	157	128	23	0.021	136	110	24	0.026	55	58	-5	0.686
VERONA	96	89	8	0.475	152	161	-6	0.465	193	157	23	0.010	191	161	19	0.030	73	81	-10	0.349
VENEZIA	113	133	-15	0.060	223	211	6	0.422	252	224	13	0.078	253	219	16	0.033	104	121	-14	0.096
TRIESTE	92	103	-11	0.251	168	174	-3	0.643	222	197	13	0.093	203	183	11	0.160	97	87	11	0.310
GENOVA	311	297	5	0.427	566	520	9	0.053	617	538	15	0.001	551	505	9	0.050	266	241	10	0.125
BOLOGNA	151	154	-2	0.807	295	279	6	0.352	330	283	17	0.010	278	280	-1	0.905	165	131	26	0.008
FIRENZE	157	172	-9	0.231	317	291	9	0.144	326	284	15	0.020	256	281	-9	0.118	108	129	-16	0.043
ANCONA	54	36	50	0.014	76	66	15	0.251	90	74	22	0.092	58	67	-13	0.237	35	29	21	0.310
PERUGIA	60	55	9	0.519	118	106	11	0.269	146	106	38	0.001	112	102	10	0.345	52	52	0	1.000
ROMA	868	892	-3	0.415	1678	1609	4	0.092	1987	1660	20	<0.001	1663	1556	7	0.009	786	733	7	0.059
VITERBO	22	24	-8	0.670	35	37	-5	0.735	49	38	29	0.116	50	40	25	0.157	20	17	18	0.502
RIETI	16	17	-6	0.803	28	30	-7	0.705	45	29	55	0.017	33	27	22	0.296	12	13	-8	0.773
CIVITAVECCHIA	20	18	11	0.655	25	27	-7	0.689	25	31	-19	0.230	39	32	22	0.262	8	13	-38	0.077
FROSINONE	14	12	17	0.593	18	26	-31	0.059	33	23	43	0.082	32	25	28	0.216	7	10	-30	0.257
LATINA	38	33	15	0.417	56	53	6	0.688	77	65	18	0.171	57	68	-16	0.145	31	28	11	0.590
PESCARA	40	36	11	0.527	85	70	21	0.104	105	73	44	0.002	83	70	19	0.154	43	28	54	0.022
CAMPOBASSO	18	14	29	0.346	25	26	-4	0.841	41	28	46	0.042	28	24	17	0.450	11	12	-8	0.763
NAPOLI	323	347	-7	0.182	575	619	-7	0.067	731	680	8	0.059	624	677	-8	0.034	237	306	-23	<0.001
CAGLIARI	41	48	-15	0.274	101	82	23	0.059	97	90	8	0.477	105	81	30	0.019	32	38	-16	0.289
BARI	93	83	12	0.300	139	146	-5	0.553	184	165	12	0.161	154	166	-7	0.334	95	70	36	0.010
REGGIOCALABRIA	53	60	-12	0.336	101	107	-6	0.550	122	113	8	0.415	131	107	22	0.096	62	56	11	0.446
MESSINA	106	86	23	0.052	128	161	-20	0.004	208	168	24	0.006	182	174	5	0.553	79	78	1	0.910
PALERMO	231	189	23	0.006	355	343	3	0.524	385	359	7	0.185	420	361	16	0.004	208	159	31	0.001
AOSTA	23	15	53	0.095	24	25	-4	0.838	41	24	71	0.008	16	26	-38	0.012	20	9	122	0.014
TRENTO	37	33	12	0.511	66	71	-7	0.538	61	64	-5	0.701	60	58	3	0.796	23	30	-23	0.144
PADOVA	90	93	-3	0.752	164	163	1	0.938	178	164	9	0.294	186	164	13	0.107	96	75	28	0.032
LAQUILA	28	19	47	0.089	35	34	1	0.866	39	33	18	0.337	37	33	12	0.511	7	10	-30	0.257
POTENZA	20	17	18	0.502	33	41	-20	0.164	56	38	47	0.016	41	38	8	0.639	21	19	11	0.663
TARANTO	41	57	-28	0.012	73	99	-26	0.002	116	112	4	0.710	97	103	-6	0.542	41	49	-16	0.212
CATANZARO	28	24	17	0.450	38	43	-12	0.417	60	39	54	0.007	46	40	15	0.376	18	19	-5	0.814

Decessi giornalieri osservati, decessi attesi e variazione percentuale nella classe di età 65 anni e oltre per il periodo dal 15 maggio al 15 settembre, divisi per mese. Centro di Competenza Nazionale Dipartimento della Protezione Civile, DEP Lazio, Regione Lombardia. (16)

Ringraziamenti

Questo lavoro non sarebbe stato possibile senza l'aiuto del professor Mattia de Amicis e di Fondazione Osservatorio Meteorologico Milano Duomo, in particolar modo ringrazio Samantha Pilati e Cristina Lavecchia che con pazienza hanno saputo chiarire ogni mio dubbio.

Ringrazio la mia famiglia per avermi sostenuta durante questi tre anni, e mia sorella Federica che mi è stata accanto in ogni mia scelta.

Un immenso grazie va a Simone e alla sua estrema pazienza che gli ha permesso di supportarmi, e anche sopportarmi, con amore.

Non posso, infine, non ringraziare i miei compagni di Università con cui ho riso, pianto, condiviso ansie e gioie in questi tre anni.