

3.

IL CLIMA E GLI INDICATORI NELL'AMBIENTE URBANO

3.1. Introduzione al clima e definizioni

Una trattazione corretta del clima su aree di limitata estensione come quelle urbane richiede innanzitutto un opportuno chiarimento sulla definizione stessa di clima e un necessario inquadramento nei fenomeni a più ampia scala, da quella regionale a quella globale.

Il primo aspetto è delucidato dal Box 2, che introduce semplici ma basilari definizioni che permettono di evitare possibili (e frequenti) errori interpretativi, distinguendo tra tempo meteorologico e clima.

Box 2. Definizioni di base e distinzione tra tempo e clima

Tempo e meteorologia

Il tempo meteorologico è lo stato istantaneo e locale dell'atmosfera, descritto in termini fisici da variabili misurabili quali:

- pressione,
- temperatura,
- umidità,
- velocità e direzione del vento,
- radiazione,
- precipitazione.

Ha un'ampia dinamica giornaliera o di brevissimo periodo. La meteorologia osserva, studia e prevede il tempo. La sua osservazione (tramite stazioni meteorologiche in superficie, sondaggi verticali, satelliti dedicati, radar e altro) e la sua previsione (tramite i modelli numerici) rientrano nelle attività della meteorologia operativa.

Esempi: un temporale in atto, condizioni di nebbia su una certa area ad una certa ora, condizioni di cielo sereno e vento calmo al mattino su una certa località, e così via.

Clima e climatologia

Il clima è l'insieme delle condizioni medie del tempo locale, regionale o globale, rispetto ad uno specifico intervallo temporale (decade, mese, stagione o anno). La climatologia definisce queste condizioni medie alle varie scale, analizzando le serie storiche delle misure istantanee del tempo meteorologico.

Data l'elevata variabilità del tempo dalla scala giornaliera a quella annuale, le medie devono essere calcolate su periodi molto lunghi: l'Organizzazione Meteorologica Mondiale (WMO: World Meteorological Organization), agenzia delle Nazioni Unite preposta a meteorologia e climatologia ha definito i Climate Normals (CLINO) su base trentennale: ad esempio i CLINO 1961-90.

Il clima ha una variabilità temporale lenta (i cosiddetti cambiamenti climatici), che deve essere valutata insieme ai fattori che la governano.

Il secondo punto permette di comprendere gli aspetti climatici locali, in particolare quelli urbani, in quanto conseguenza (anche se non esclusiva) del clima a più grande scala: quello globale e quello regionale. Per scala si intende l'intervallo spaziale su cui si analizza il tempo o di cui si descrive il clima:

in particolare la meteorologia si occupa prevalentemente ma non esclusivamente della scala sinottica (fenomeni dalle dimensioni caratteristiche dell'ordine delle centinaia o migliaia di chilometri in senso orizzontale come, ad esempio, le classiche perturbazioni delle medie latitudini caratterizzate da fronti caldi, freddi e occlusi).

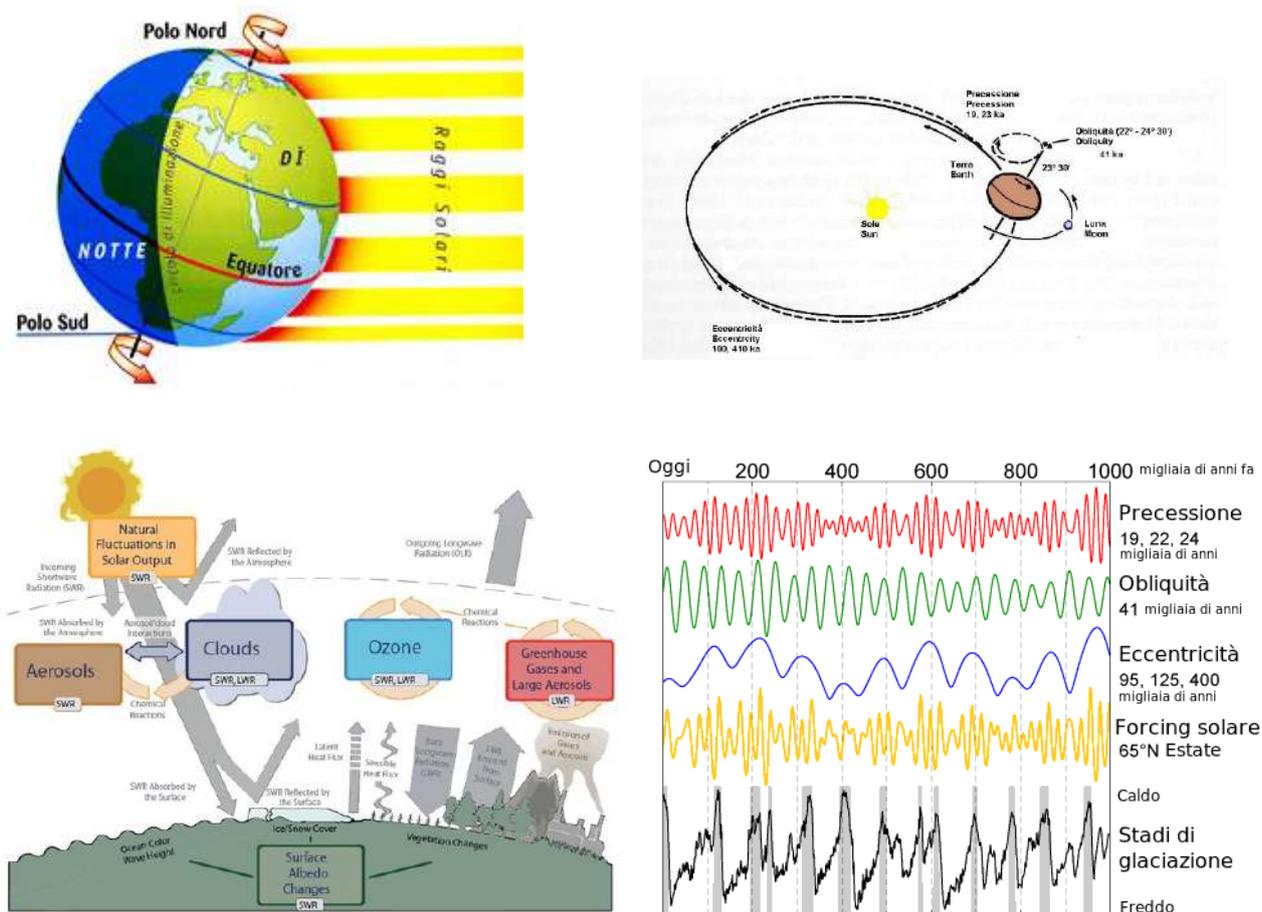


Figura 9. Condizioni astronomiche e fisiche che determinano il clima terrestre. In alto a sinistra: l'inclinazione dell'asse terrestre rispetto al piano orbitale (eclittica) determina il tipico alternarsi delle stagioni. In alto a destra: le variazioni periodiche dei parametri orbitali della Terra dovute alle perturbazioni degli altri pianeti modificano la quantità di radiazione solare che giunge alla Terra, determinando glaciazioni e interglaciali. In basso a sinistra: le principali componenti superficiali e atmosferiche che determinano il bilancio radiativo planetario (fonte: IPCC AR5 Working Group I Report "Climate Change 2013: The Physical Science Basis"). In basso a destra: (fonte: Lee, J. (2012). Milankovitch cycles. Retrieved from http://editors.eol.org/eoearth/wiki/Milankovitch_cycles).

Alla scala globale il clima della Terra è condizionato:

- dalla fonte primaria di energia costituita dal Sole, una stella in condizioni di equilibrio e che per le sue caratteristiche assicura stabilità su tempi anche astronomicamente lunghissimi;
- dall'orbita terrestre e dall'inclinazione dell'asse di rotazione della Terra, nonché dalle sue perturbazioni periodiche che hanno in gran parte controllato il clima del passato (glaciazioni e interglaciali);
- dalle caratteristiche morfologiche e fisiche della superficie terrestre e dalle proprietà chimico-fisiche e radiative dell'atmosfera.

La Figura 9 riassume sinteticamente questi aspetti, la cui conseguenza determina il fatto che la temperatura media alla superficie terrestre risulta essere di circa 15°C.

Classificazione climatica mondiale secondo il sistema Köppen–Geiger

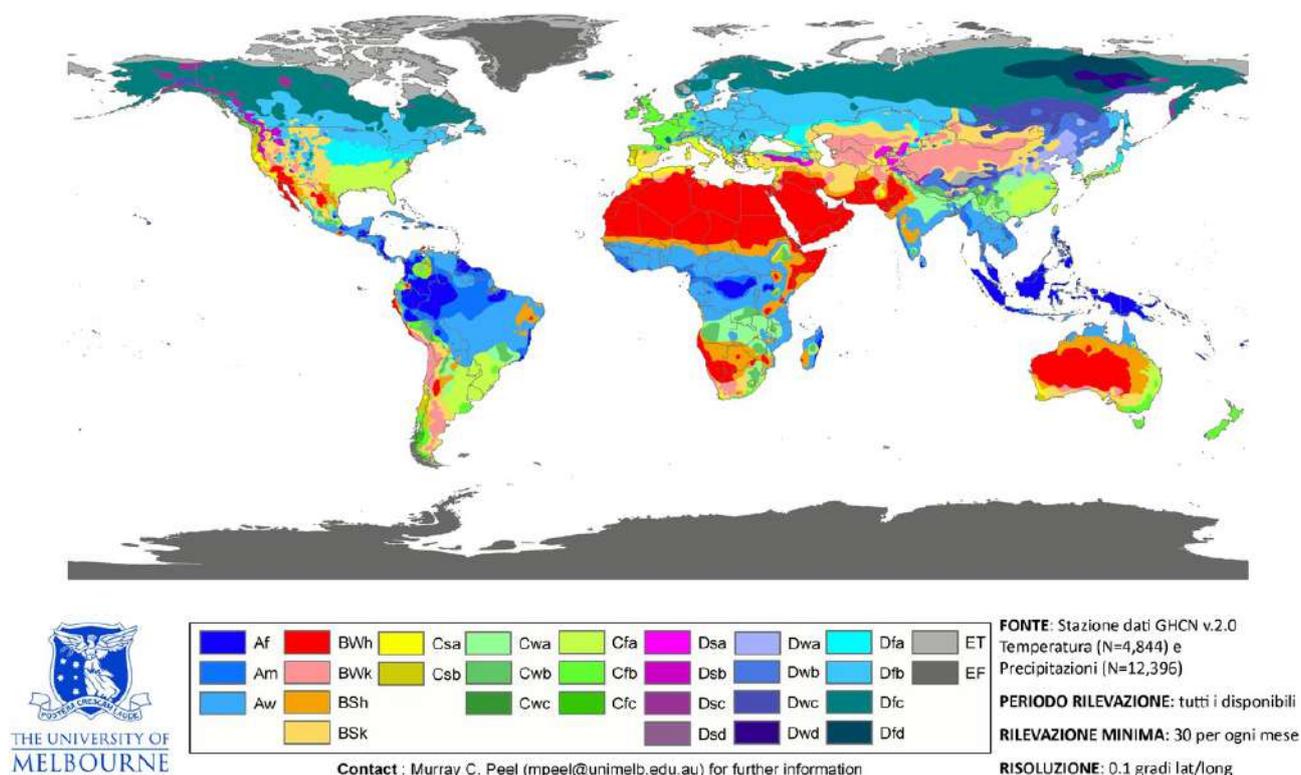


Figura 10. La distribuzione dei climi terrestri secondo lo schema classico di Köppen - Geiger (fonte: Peel MC, Finlayson BL & McMahon TA, 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification, Hydrol. Earth Syst. Sci. 11, 1633-1644)

Il clima planetario, condizionato dalle forzanti astronomiche, dalla geografia e dalla chimica del sistema atmosfera-oceani, determina ad una scala inferiore quello regionale. Lo storico sistema di classificazione di Köppen - Geiger (1936) permette di descrivere i diversi climi terrestri in funzione di pochi indicatori (essenzialmente temperatura, umidità e precipitazione). La Figura 10 riassume brevemente questo schema e la distribuzione dei climi della Terra.

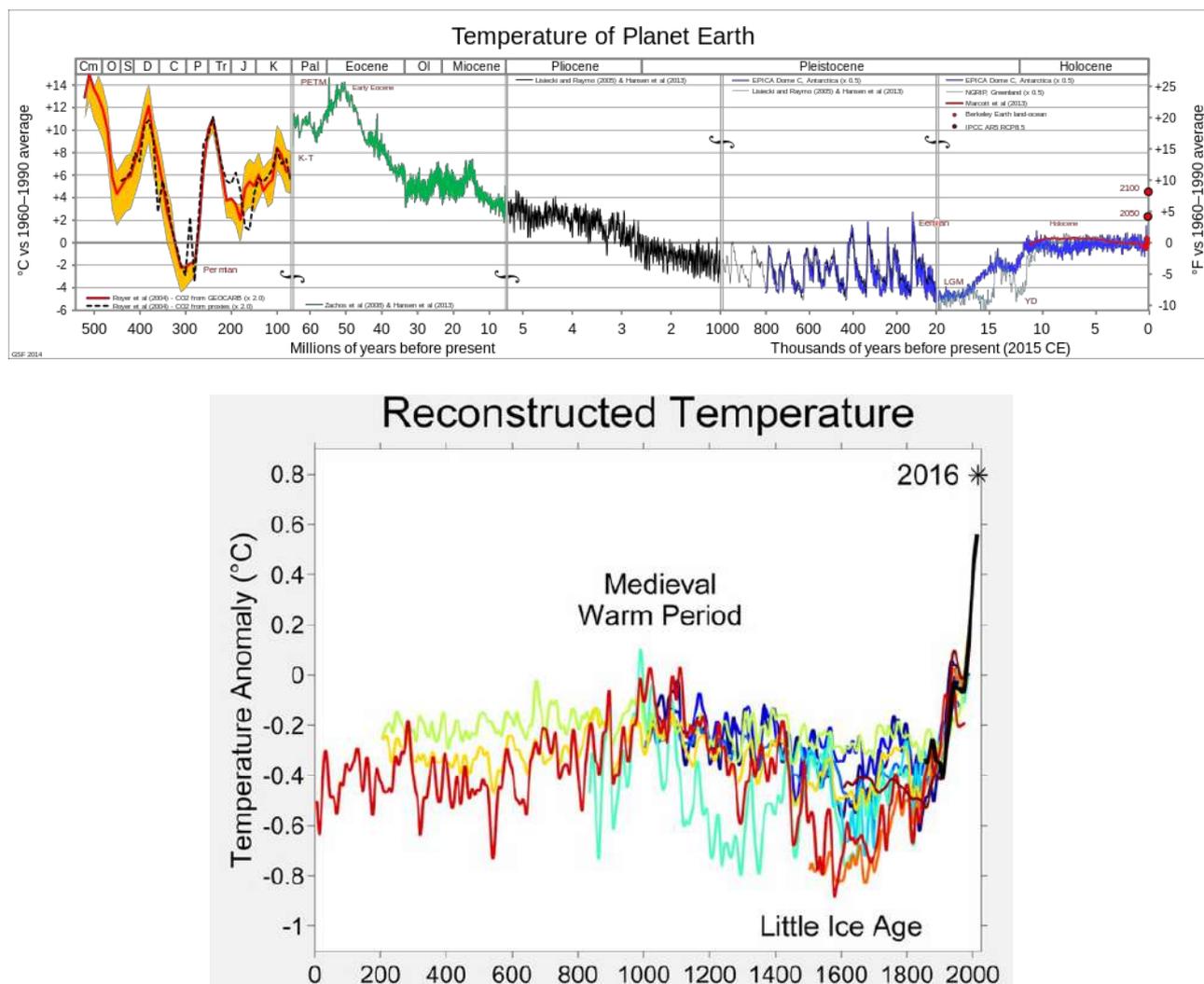


Figura 11. Ricostruzione della temperatura media della Terra nell'ultimo mezzo miliardo di anni (sopra, fonte: Glen Fergus (2015), https://commons.wikimedia.org/wiki/File:All_palaeotemps.png) e negli ultimi 2000 anni (sotto, fonte: Robert A. Rohde, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:2000_Year_Temperature_Comparison.png)

In questo progetto l'area d'interesse è ubicata nella parte centro-settentrionale della pianura padana circondata su tre lati dall'orografia alpino-appenninica e aperta verso est alle correnti sciroccali adriatiche e a quelle orientali balcaniche ed è già stata ampiamente e dettagliatamente descritta in passato⁶: nello schema di Köppen - Geiger l'area milanese è classificata come "Cfa", ovvero un clima temperato-caldo piovoso, con precipitazione in tutti i mesi dell'anno ed una temperatura media del mese più caldo superiore ai 22°C.

Una variazione del clima globale come quello della crisi climatica in atto accertato negli ultimi decenni produce inevitabilmente conseguenze anche su quello regionale: vengono infatti alterate le circolazioni atmosferiche e di conseguenza le frequenze dei diversi tipi di tempo meteorologico che, nel lungo periodo, definiscono infine il clima locale. Le ricostruzioni del clima del passato e le misure recenti sono riassunte nella Figura 11 (in ambedue i grafici in ordinata è riportata l'anomalia di

⁶ Mennella C., 1967; Pinna, M. 1977; Giuliacci, M. 1988; Crespi, A. et al, 2018; Brunetti, M. et al., 2014;

temperatura, ovvero la differenza rispetto ad un periodo di riferimento), da cui risulta evidente il riscaldamento recente.

Questo riscaldamento medio si distribuisce sulla superficie terrestre in maniera irregolare e cambia anche in funzione della stagione: la Figura 12 illustra la distribuzione spaziale dell'aumento di temperatura sull'area europea osservata in un trentennio recente, distintamente per le medie annue e quelle stagionali (inverno/estate).

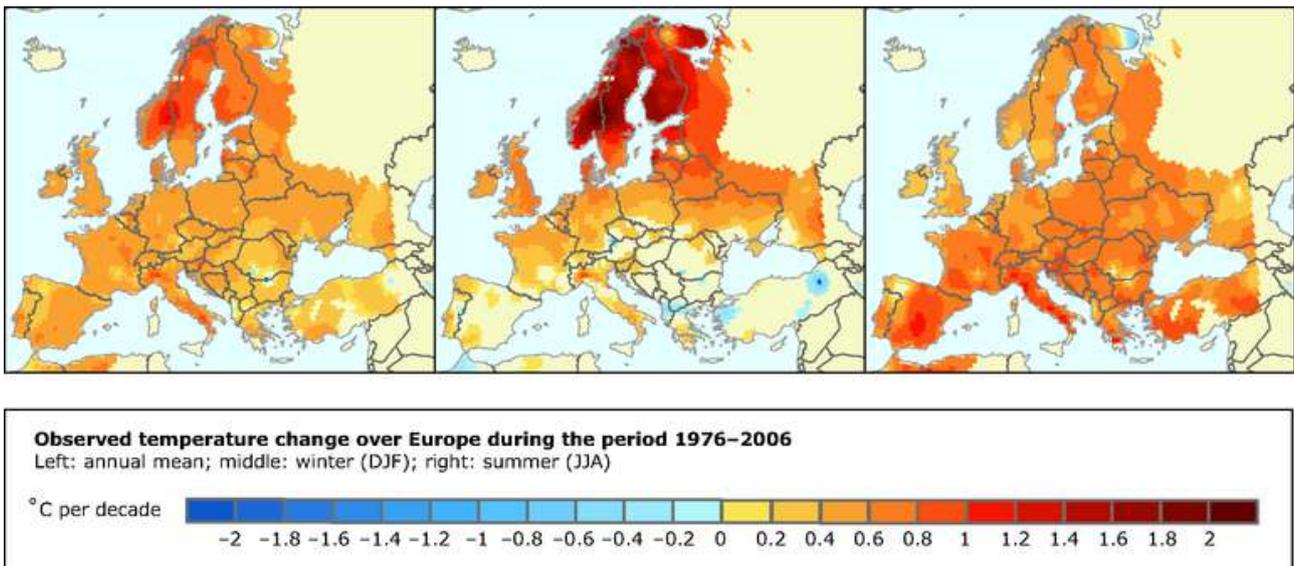


Figura 12. Distribuzione spaziale in Europa dell'aumento delle temperature medie osservate in 30 anni (da sinistra: medie annue, invernali ed estive; fonte: Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI), 2008, <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/observed-temperature-change-over-europe-1976-2006/map-5-1-climate-change-2008-observed-temperature-change.eps> (DOI: 10.13140/RG.2.2.13705.19046))

Risulta evidente il riscaldamento della penisola italiana ed in particolare della pianura padana occidentale, in quest'ultima area sia d'estate che d'inverno.

Se si considera il periodo più recente per il quale sono disponibili misure dirette delle temperature alla superficie terrestre (si assume in genere che l'inizio delle misure sufficientemente diffuse e utili decorra dal 1850), a cui è possibile attribuire incertezze molto ridotte rispetto a quelle dei metodi indiretti indispensabili per la ricostruzione del paleo clima, l'aumento delle temperature medie, sia a scala globale che regionale, appare ancora più evidente ed è chiaramente caratterizzata da un'accelerazione negli ultimi decenni (Figura 13). Calcolando l'aumento tendenziale di temperatura a partire dal 1970 si ottiene un aumento di circa 1,7°C a secolo come media globale, mentre per l'Italia questo valore sale a quasi 4 °C.

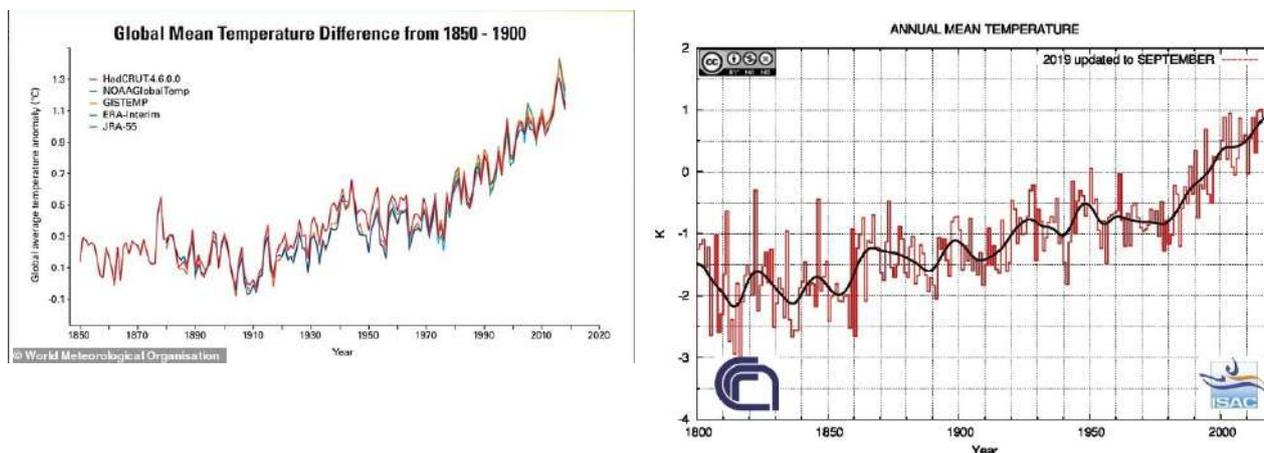


Figura 13. Aumento della temperatura documentato dalle misure meteorologiche a partire dal 1850 ad oggi. A sinistra: la media su tutta la superficie terrestre ottenuta da diversi dataset (WMO). A destra la media relativa all'Italia (CNR-ISAC).

Utilizzando in particolare la serie storica delle misure urbane di Milano, lo stesso valore sale a ben 5,6°C per secolo (Figura 39, pag. 64).

In conclusione, il riscaldamento dell'atmosfera riscontrato negli ultimi anni a scala globale si distribuisce in maniera irregolare sulla superficie terrestre. La penisola italiana è soggetta ad un riscaldamento superiore alla media globale e questo è ulteriormente accentuato nell'area urbanizzata milanese. Gli scenari prefigurati a scala globale (Figura 13) lasciano prevedere la persistenza di questa tendenza nei prossimi decenni.

3.2. Il clima urbano e l'isola di calore

L'aumento delle temperature medie osservate su Milano s'inquadra pertanto in modo coerente nel riscaldamento climatico regionale (italiano ed europeo) ed in quello globale, ma presenta una significativa accentuazione la cui origine va ricercata nella specificità delle aree urbane. Le medie climatiche su più vaste aree e globalmente vengono infatti calcolate da misure eseguite prevalentemente in aree extra-urbane, in aderenza alle prescrizioni per le osservazioni sinottiche stabilite dal WMO, difficilmente realizzabili nel contesto urbano: questo inoltre introduce effetti complessi negli scambi di calore superficie-atmosfera di origine tipicamente antropogenica.

Il clima urbano si differenzia pertanto da quello extra urbano principalmente a causa delle diverse caratteristiche morfologiche (natura fisica e geometria delle superfici edificate) e fisiologiche (produzione di calore e impermeabilità del suolo in rimo luogo) della città rispetto all'ambiente naturale circostante. La principale conseguenza è il cosiddetto fenomeno dell'isola di calore urbana (spesso indicata con l'acronimo inglese UHI Urban Heat Island⁷), per cui l'area cittadina è sovrastata nei bassi strati atmosferici da aria significativamente più calda rispetto a quella delle zone circostanti extraurbane. La Figura 14 illustra schematicamente in sezione il profilo della temperatura al di sopra di un'area urbanizzata e le principali conseguenze in termini di circolazioni indotte e nuvolosità.

⁷ Oke T. et al. 2017

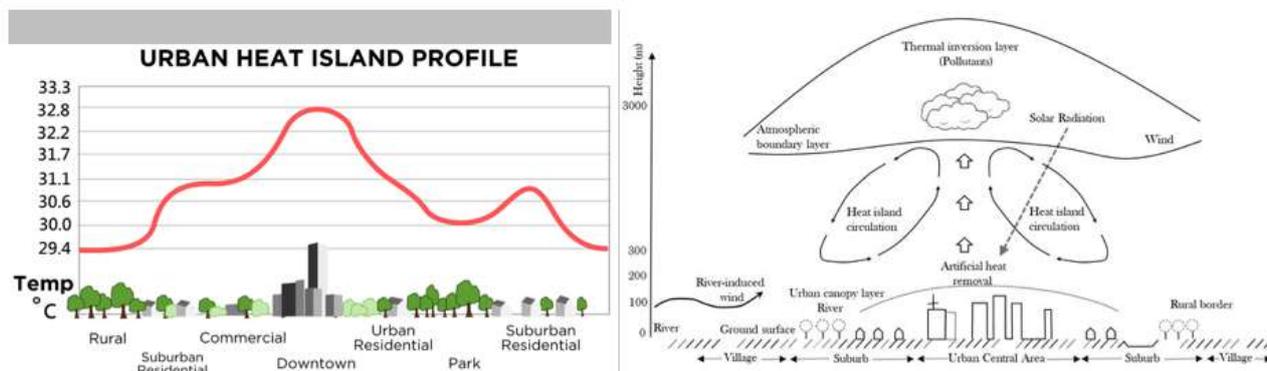


Figura 14. Sezione del profilo di temperatura al di sopra di un'area urbanizzata (a sinistra; tratto da Oke, 2017) e relativi fenomeni indotti (a destra; tratto da Yang et al., 2016).

Le cause fisiche di questo fenomeno risiedono, a parità di condizioni esterne (situazione meteorologica):

- nella generazione di calore antropogenico in città, dovuto ad attività produttive o sociali (produzioni industriali, riscaldamento, raffrescamento, traffico, ecc.);
- nella diversa velocità di raffreddamento notturno tra superfici orizzontali urbane e rurali, dovuta alla diversa emissività;
- nella capacità termica delle superfici urbane esposte alla radiazione solare, che hanno in genere una minore albedo;
- negli effetti geometrici che aumentano l'efficienza del riscaldamento radiativo diurno (Urban Canyon Effect), tramite riflessioni e assorbimenti principalmente da parte delle superfici verticali (pareti degli edifici);
- nell'attenuazione del vento nei cosiddetti canyon urbani.

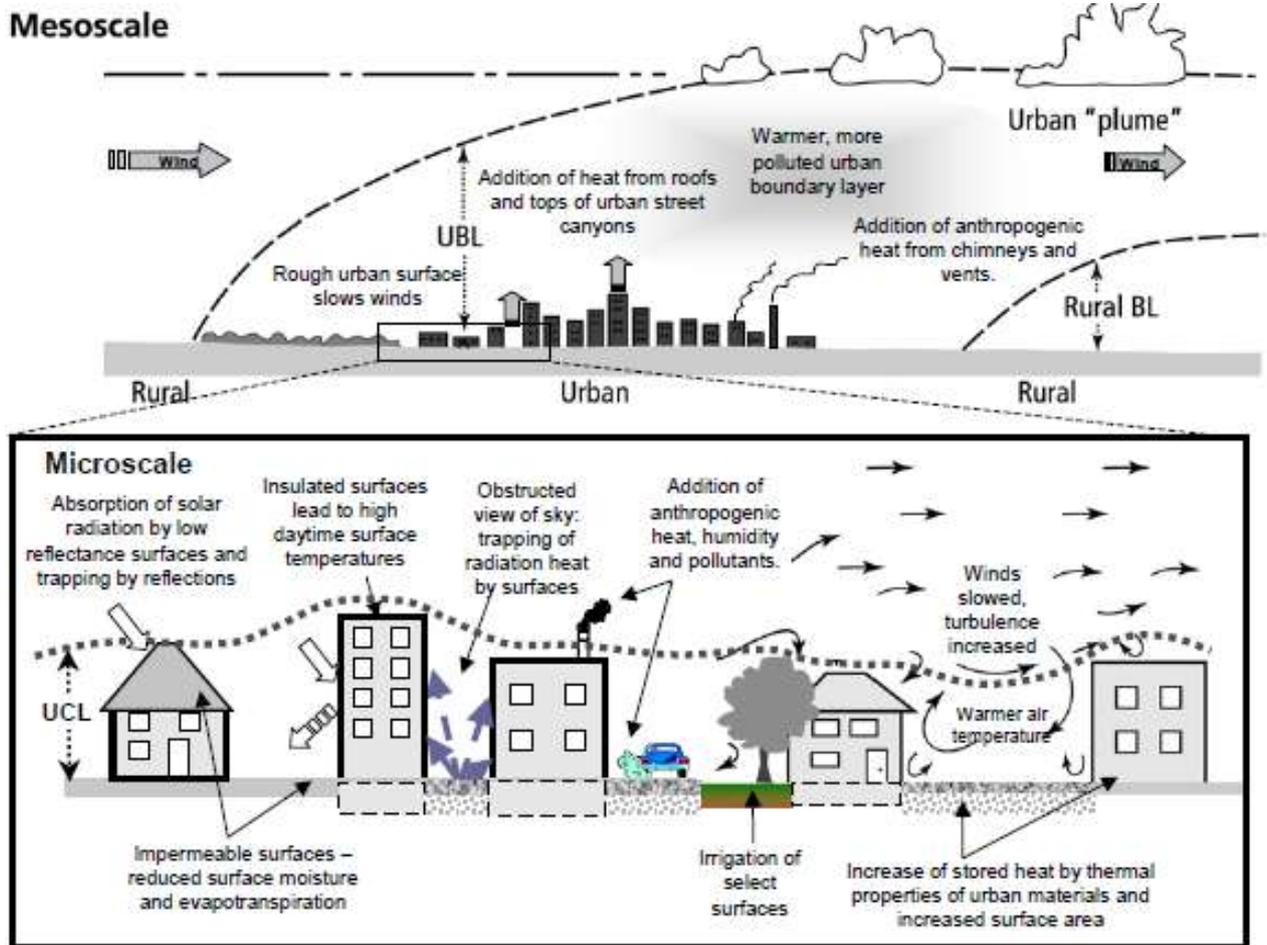


Figura 15. Sintesi dei processi che avvengono nell'atmosfera urbana all'origine del fenomeno dell'isola di calore (tratto da Voogt, 2004)

Si tratta, come si vede, essenzialmente di fattori morfologici e fisiologici che possono essere anche fortemente variabili tra città diverse anche in funzione delle caratteristiche geo-topografiche. La complessità dei processi implicati nel fenomeno è schematizzata in Figura 15. Si noti che la cupola d'aria calda che costituisce l'isola di calore, centrata in genere sulla città e con intensità massima in corrispondenza del centro città (spesso indicata in inglese con il termine "dome"), può deformarsi estendendosi in un pennacchio (in inglese "plume") sottovento per effetto di una circolazione a più grande scala (sinottica).

Il fenomeno dell'isola di calore urbana è misurabile in termini di differenza di temperatura tra città e campagna circostante tramite l'Indice UHI definito come:

$$I_{UHI} = T_u - T_r$$

dove u = urbano
 r = rurale

Tale fenomeno è più accentuato in determinate condizioni meteorologiche ed è invece ridotto in altre e può talvolta anche assumere valori negativi.

La definizione precisa delle due temperature è tuttavia essenziale:

- In ambito urbano le temperature T_u possono essere misurate a diversi livelli (ovvero in diversi strati della complessa atmosfera urbana): si distinguono principalmente le temperature registrate nella canopea urbana (Urban Canopy: in genere al di sotto della o fino alla quota media dell'edificato) e quelle della superficie vera e propria. Le prime descrivono la Canopy Urban Heat Island (C-UHI) e sono in genere misurate "in situ", le seconde la Surface UHI (S-UHI) e sono desunte da misure in telerilevamento principalmente da satellite. È necessario ricordare che nella canopea urbana le temperature possono dipendere dall'altezza rispetto alla superficie locale, dalla localizzazione in senso urbanistico (quartiere) e dall'effettiva esposizione dei sensori per gli effetti sensibili di superfici riflettenti o emittenti e circolazioni locali (misure a livello strada in un "canyon" urbano non saranno in genere direttamente confrontabili con misure prese alla sommità della canopea, ad esempio sul tetto di un edificio o su una torre; ma anche il diverso posizionamento su un terrazzo aperto alla sommità di un edificio può influire sulle misure in funzione della vicinanza a pareti verticali sottostanti specialmente se orientate verso sud e soleggiate).
- In ambito extraurbano si farà ricorso in genere a misure "in situ" (stazioni sinottiche o agrometeorologiche) per la C-UHI o a dati satellitari per la S-UHI.
- Il valore massimo dell'indice UHI è in genere legato alle dimensioni urbane e/o alla densità di popolazione e varia molto anche in funzione della morfologia e fisiologia urbana. In particolare, le condizioni favorevoli allo sviluppo di una pronunciata isola di calore sono caratterizzate da:
 - cieli sereni o poco nuvolosi, che consentono un maggiore irraggiamento diurno e notturno;
 - scarsa ventilazione sinottica, che limita il rimescolamento turbolento;
 - strato d'inversione termica, che inibisce i moti verticali.

Il valore istantaneo di questo indice per una data città è pertanto fortemente variabile nel tempo anche in funzione della stagione, dell'ora e delle condizioni meteorologiche: in genere è maggiore nelle ore serali e notturne e nei mesi freddi. Inoltre, è caratterizzato da una variabilità spaziale dovuta alla distribuzione dell'edificato nelle varie parti della città. Per tener conto di questo si fa in genere riferimento ad una classificazione morfologica della superficie cittadina proposta da Stewart e Oke⁸ e indicata con l'acronimo LCZ (Local Climate Zone). Questa classificazione, riassunta in Figura 16, è riconducibile a parametri morfologici misurabili e permette d'interpretare le misure dell'indice IUHI in funzione delle caratteristiche di urbanizzazione.

Il presupposto all'informazione climatologica applicativa (rappresentata dagli indicatori) è costituito innanzitutto dalla conoscenza sufficientemente dettagliata della climatologia urbana (in relazione alla sua morfologia e fisiologia) e della sua evoluzione temporale in termini di variabili meteorologiche

⁸ Stewart and Oke, 2012

(almeno di quelle essenziali: "Essential Climate Variables" o ECV, in sostanza quelle elencate in Box 2). Da questa informazione primaria è poi possibile calcolare una serie di indicatori climatici di diretto uso applicativo, che permettano l'impiego corretto dell'informazione climatologica nei vari contesti delle attività urbane. La misura continuativa e documentata delle variabili meteorologiche relative a questi ed altri fenomeni atmosferici costituisce la base da cui ottenere una corretta climatologia. Gli indicatori applicativi climatologici, così come individuati dal Progetto, vengono poi calcolati in base alle medie di lungo periodo delle stesse variabili.

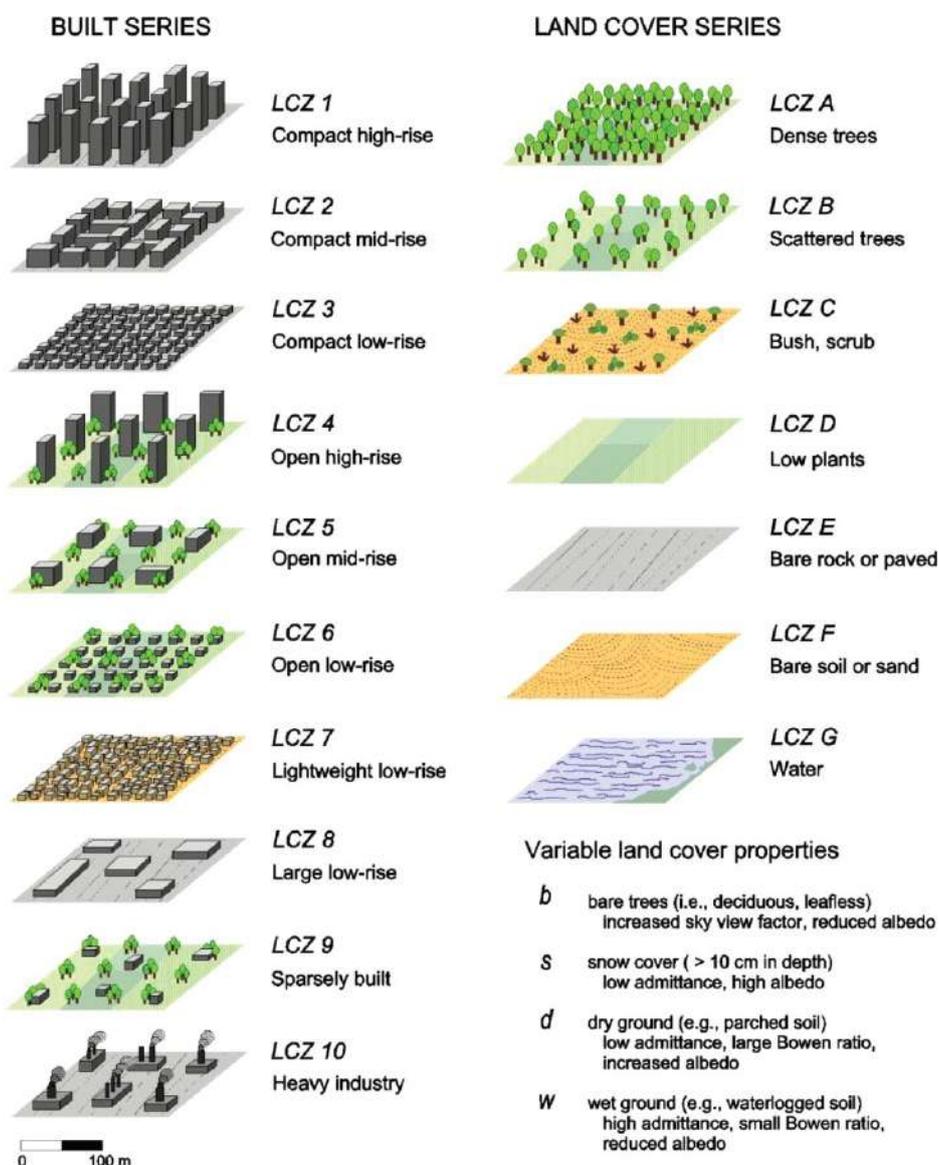


Figura 16. Schema della classificazione delle zone climatiche locali (LCZ) (fonte: Iain D. Stewart, T. R. Oke, E. Scott Kravynhoff, Evaluation of the 'local climate zone' scheme using temperature observations and model simulations, 2013, <https://doi.org/10.1002/joc.3746>)