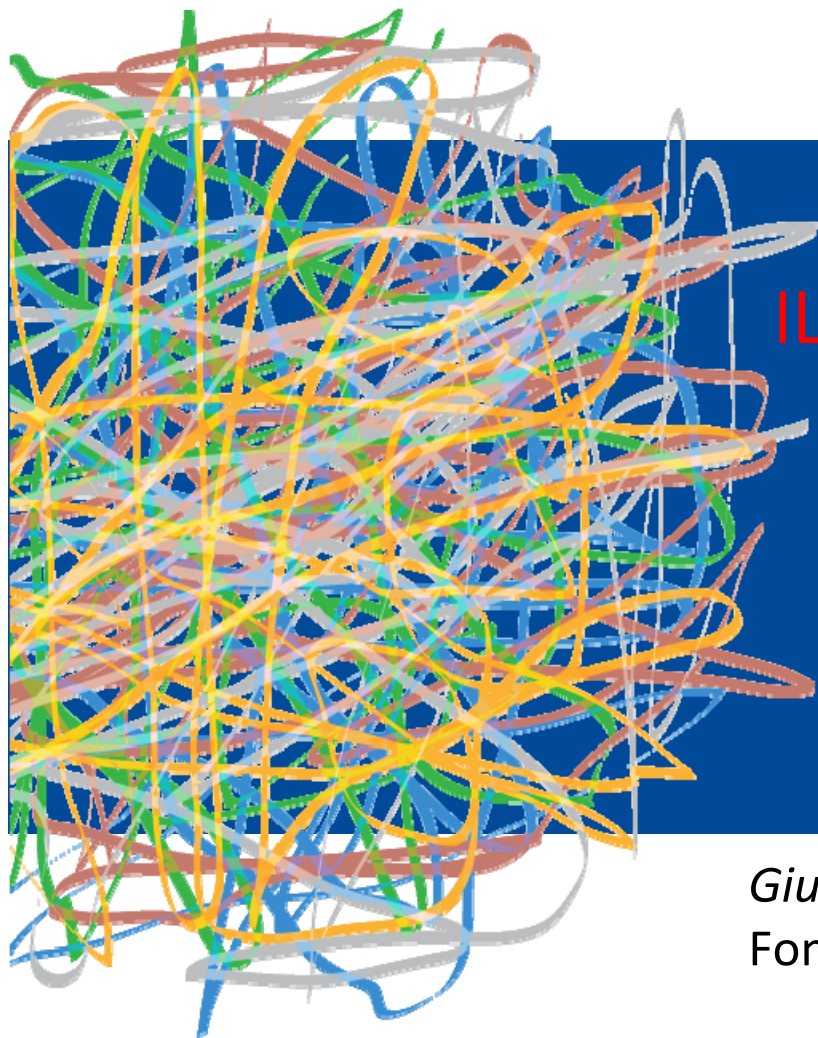




IL RUOLO DELLA METEOROLOGIA LOCALE

Condizioni meteo-climatiche locali
sfavorevoli alla dispersione degli inquinanti

Giuseppe Frustaci

Fondazione Osservatorio Meteorologico Milano Duomo

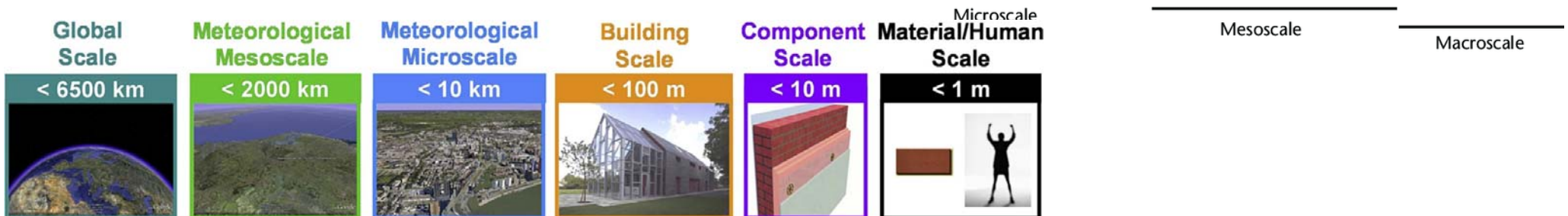
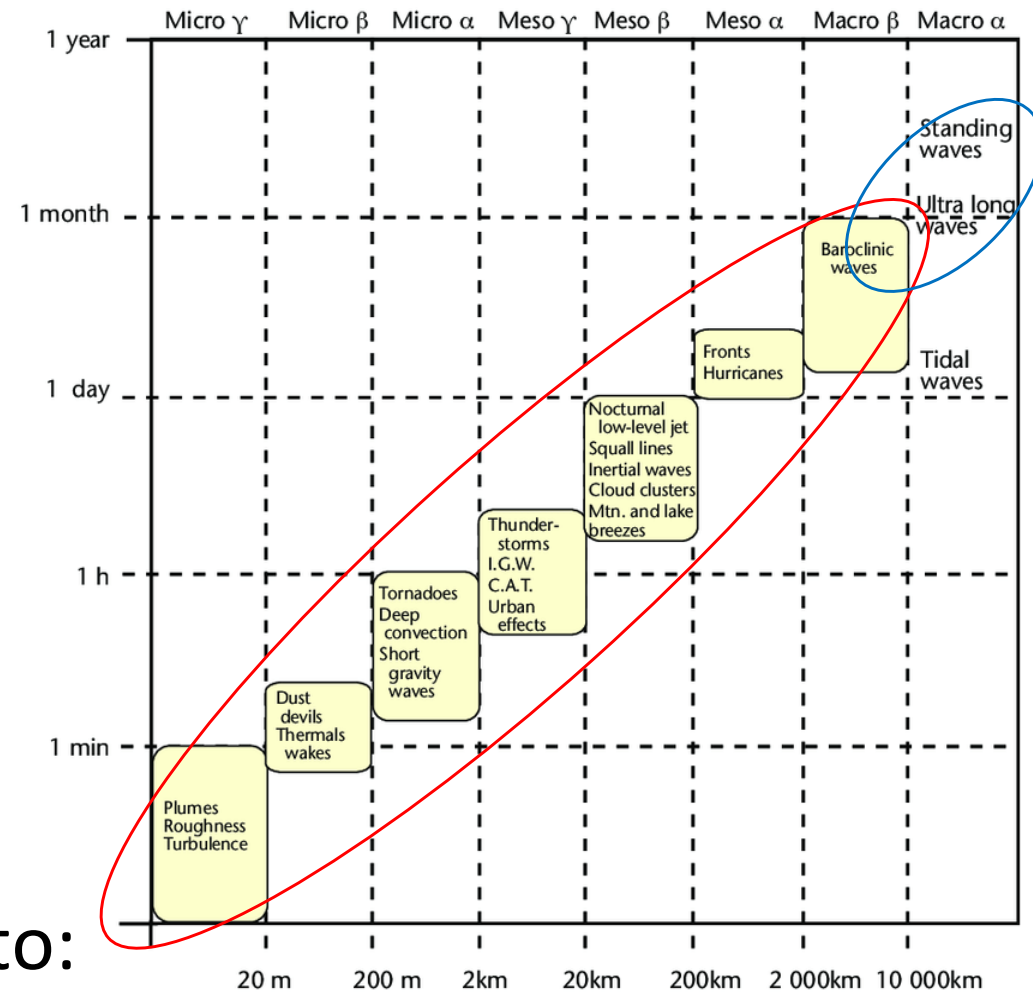
Sala Affreschi - Palazzo Isimbardi

Via Vivaio 1, Milano

29 novembre 2018

Meteorologia e clima

- Diagramma di Orlanski:
Scale spatio-temporali della:
 - Meteorologia
 - Climatologia
- Scale spaziali dell'inquinamento:



Definizioni

- **Tempo** (weather): **stato istantaneo locale** dell'atmosfera, descritto in termini fisici da alcune variabili quali pressione, temperatura, umidità, velocità e direzione del vento, radiazione, precipitazione, ed altre.
Ha una **dinamica giornaliera o di medio-breve periodo**

- **Clima** (climate): l'insieme delle **condizioni medie del tempo** di certe località, rispetto ad uno specifico intervallo temporale che è più lungo di quello del tempo meteorologico.

In termini fisici si tratta di un aggregato medio degli stati interni di un sistema, associati con misure della sua variabilità **per un determinato intervallo temporale** e con la descrizione delle interazioni che intercorrono con l'esterno (Peixoto e Oort, 1984).

Ha una **variabilità temporale e geografica molto più ampia**, che deve essere valutata insieme ai fattori che la governano.

CLINO

Il WMO (World Meteorological Organization, [WMO 1984](#))
definisce CLImatological standard NOrmals come

*“averages of climatological data computed for the following
consecutive periods of 30 years:*

January 1, 1901 to December 31, 1930

January 1, 1931 to December 31, 1960, etc.

The latest CLINO period is 1961-1990

The next CLINO period is 1991 - 2020.”

NB: in ambito urbano questa definizione, pur necessaria per tener conto della marcata variabilità interannuale, può rivelarsi insufficiente per molte applicazioni a causa dei rapidi mutamenti urbanistici

Composizione chimica

COMPONENTI

AZOTO (78%)

Fissato dai batteri azotofissatori nel suolo, restituito poi all'atmosfera.

OSSIGENO (21%) stato libero, mol. bi-triatomiche (O_3 , ozono). Prodotto da piante.

ANIDRIDE CARBONICA

(0,03%) Prodotta da: vulcani, processi di combustione, respirazione... utilizzata sempre da vegetali.

PULVISCOLO

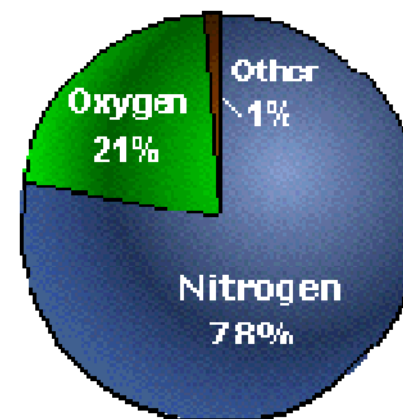
Minerali portati dal vento, spore, batteri...

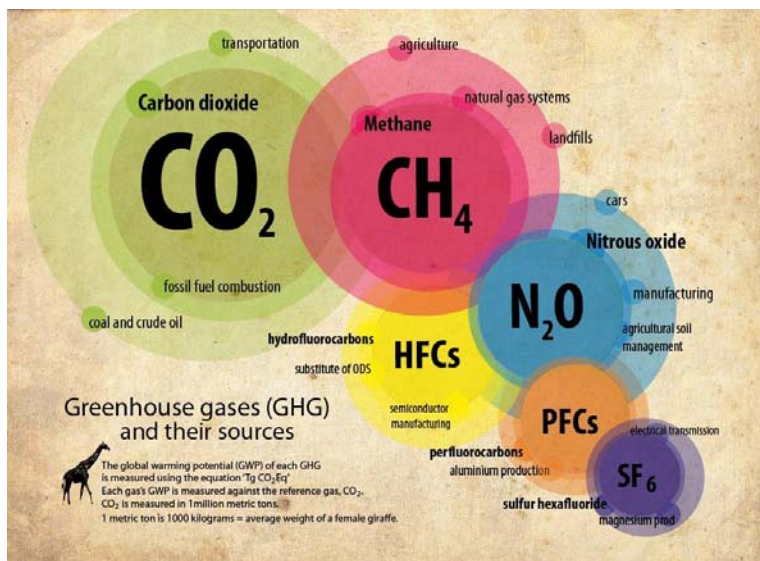
VAPOR D'ACQUA

Formazione di nubi e precipitazioni. Assorbe en. irradiata dalla Terra e emanata dal sole.

ALTRO:

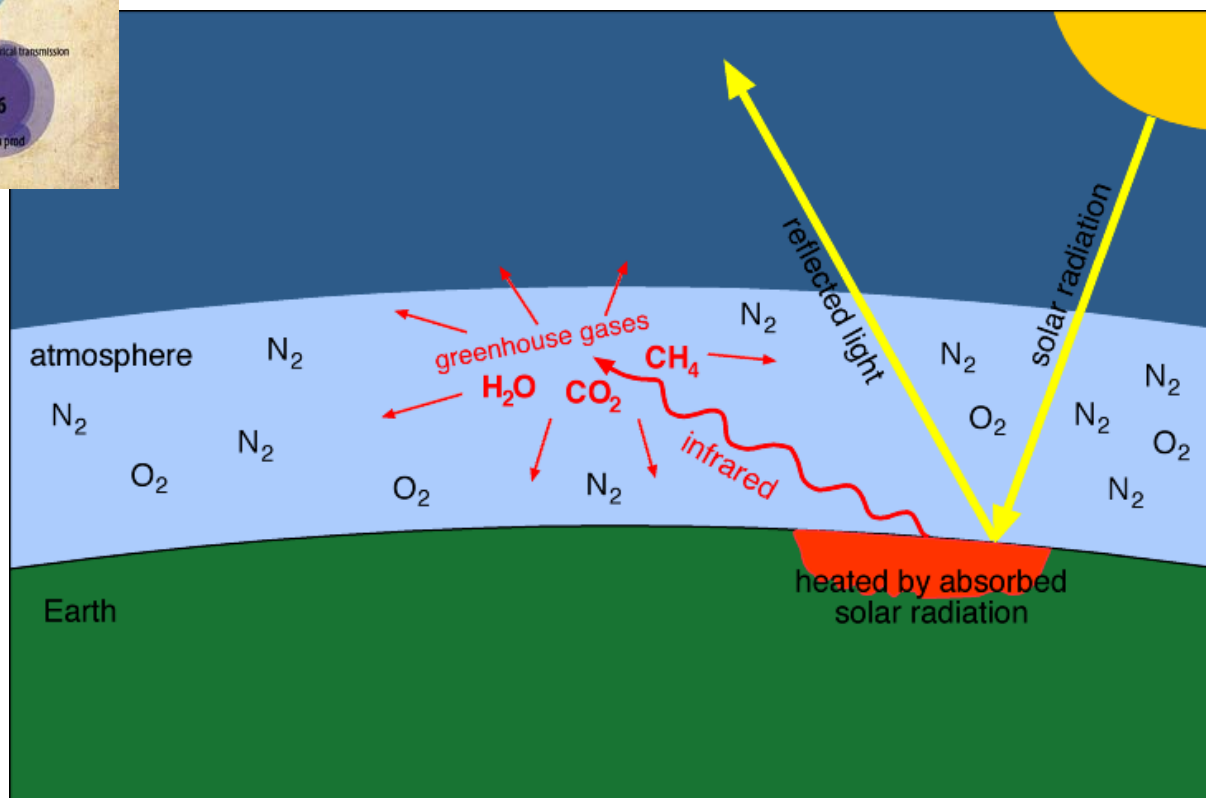
CO , SO_2 , H_2SO_4 , H_2S , in zone abitate e industriali.





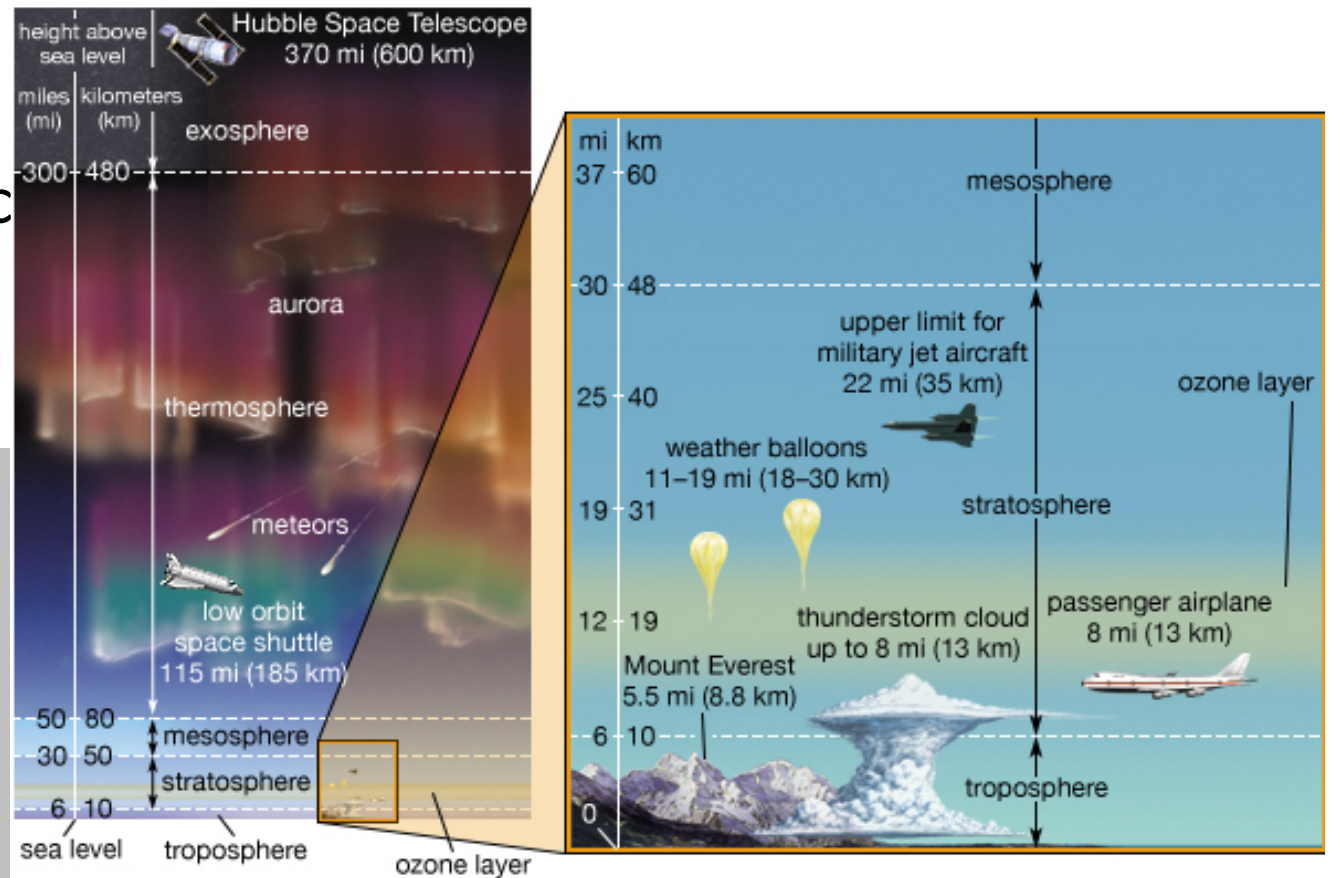
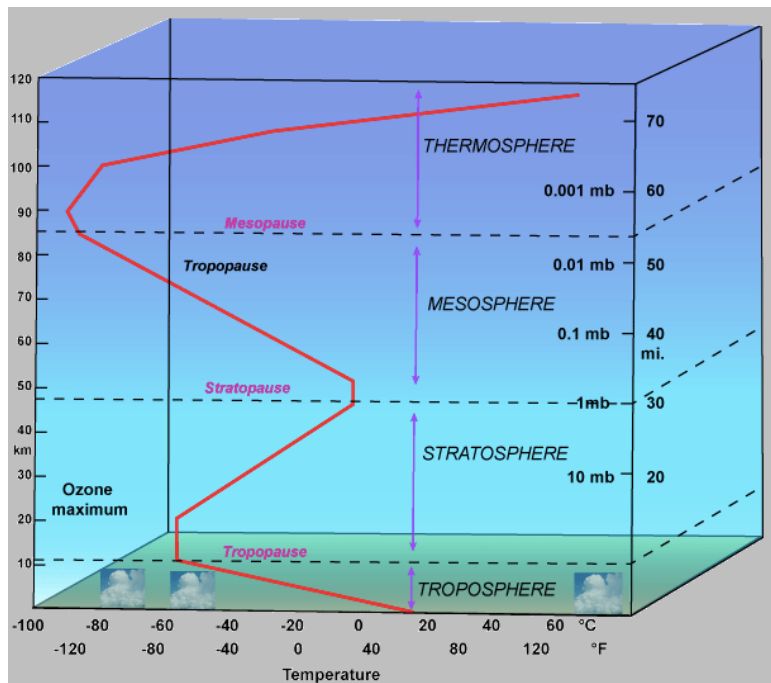
Irraggiamento solare e effetto serra

Il bilancio radiativo tra radiazione solare incidente, riemissione infrarossa della superficie terrestre e diffusione della stessa da parte dei GHG determina una temperatura media superficiale di circa **15°C**.



L'atmosfera

- Chimica
(omogenea+H₂O var.)
- Profili verticali di T, P, ecc
- Bilancio radiativo
(Sole+GHG)



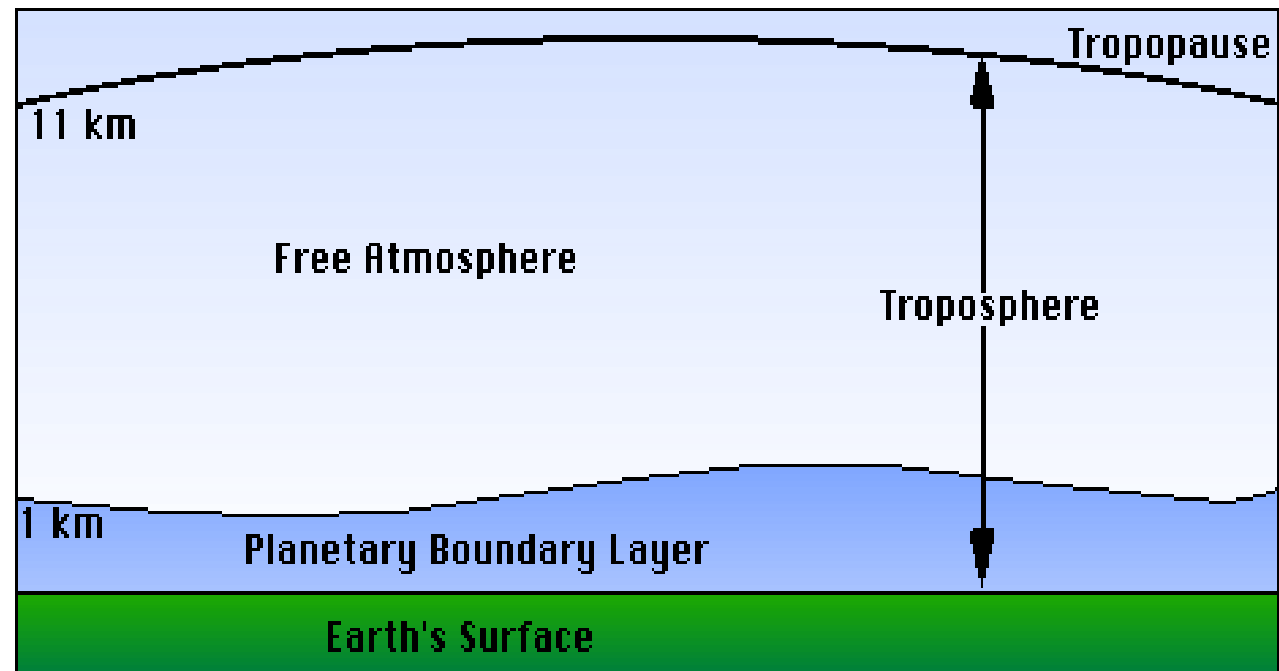
Equilibrio idrostatico e geostrofico
in buona generale approssimazione

Lo strato limite planetario: Planetary Boundary Layer (PBL)

Porzione di troposfera:

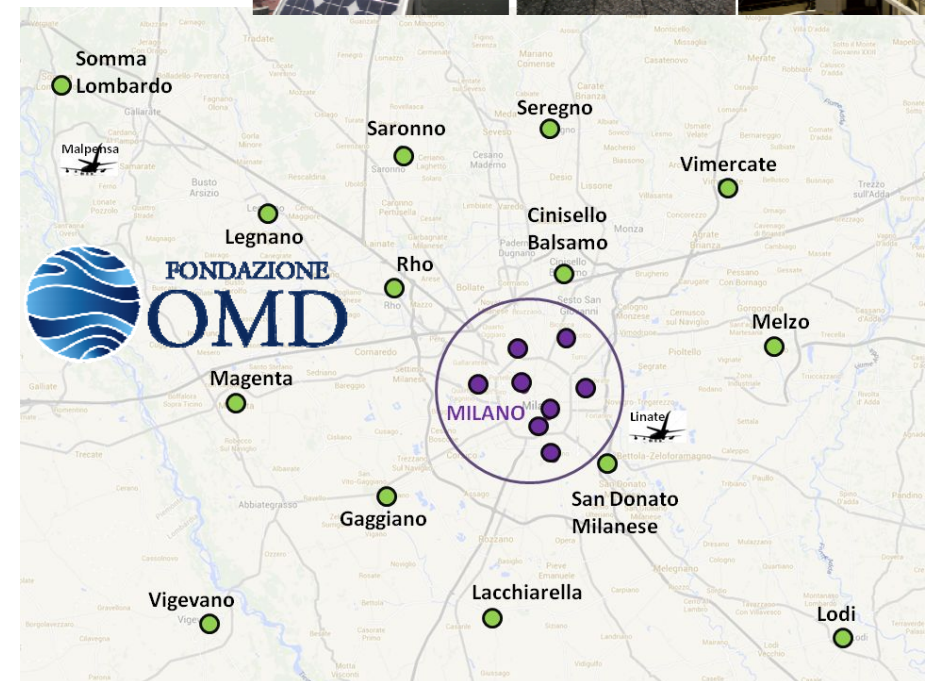
- posta a diretto contatto con il suolo,
- influenzata dalla superficie terrestre, e che
- risponde alle variazioni con una scala di tempo di $\sim 1h$.

L'influenza della superficie si riflette in una marcata variazione giornaliera legata all'irraggiamento solare.



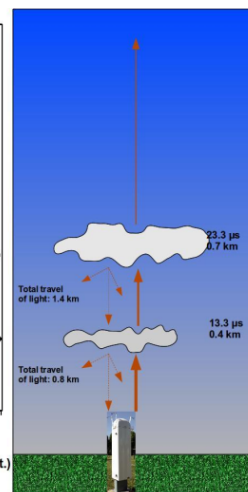
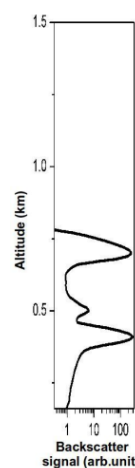
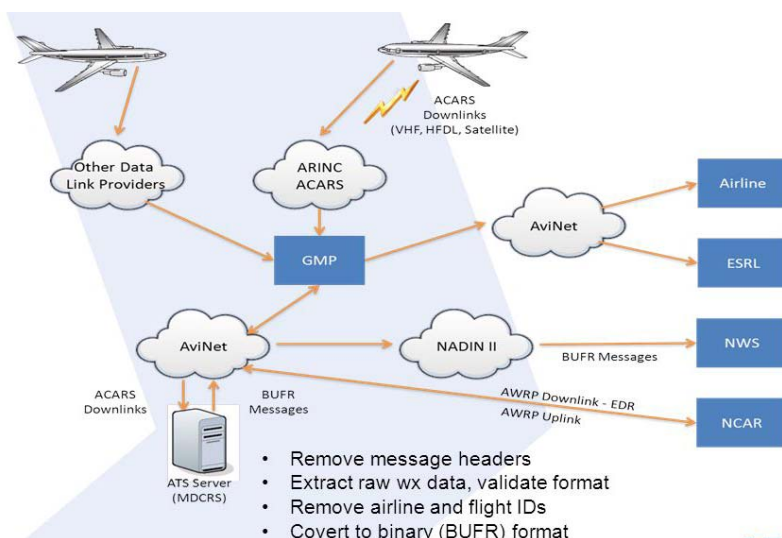
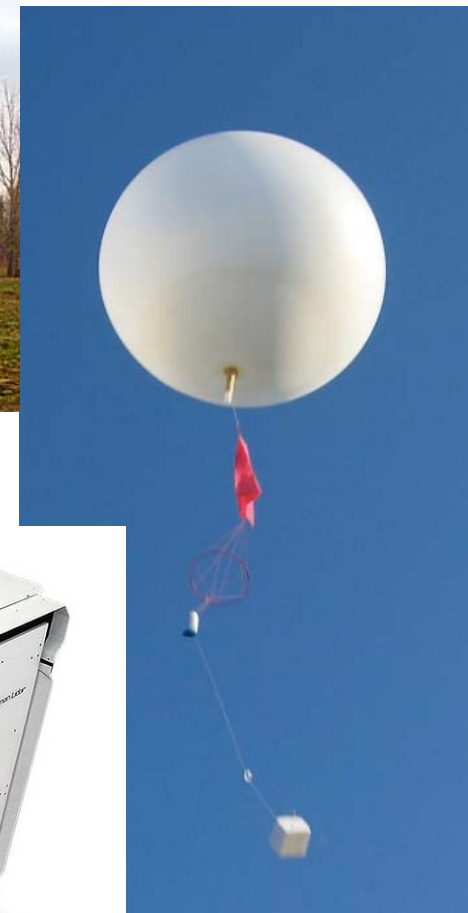
Osservazioni e misure in superficie

Reti di misura differenziate per scopi e tipologia



Misura dei profili verticali

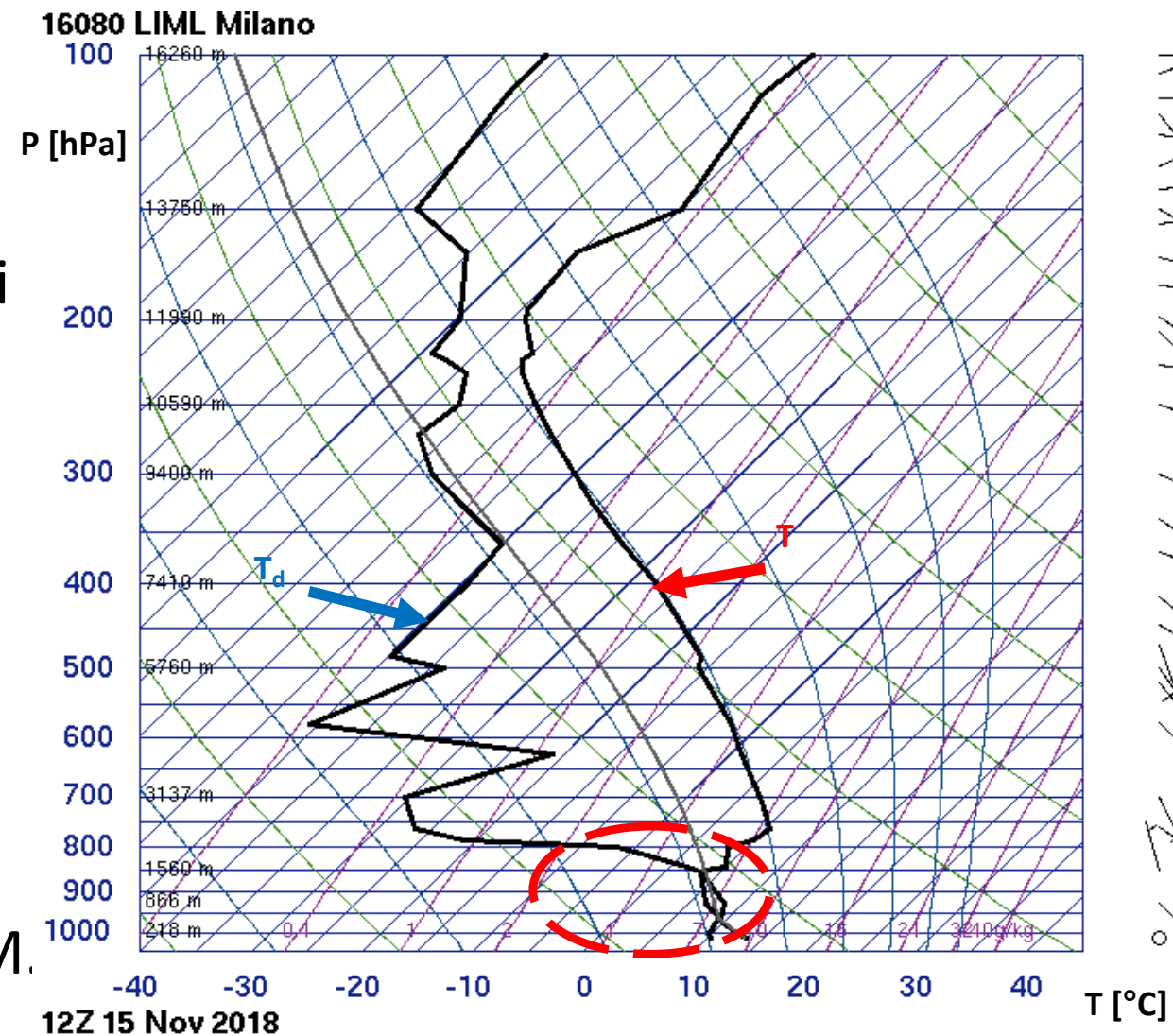
- Radiosondaggi tropo-stratosferici
- Sodar
- Lidar
- Amdar (Aircraft Meteorological Data Relay)



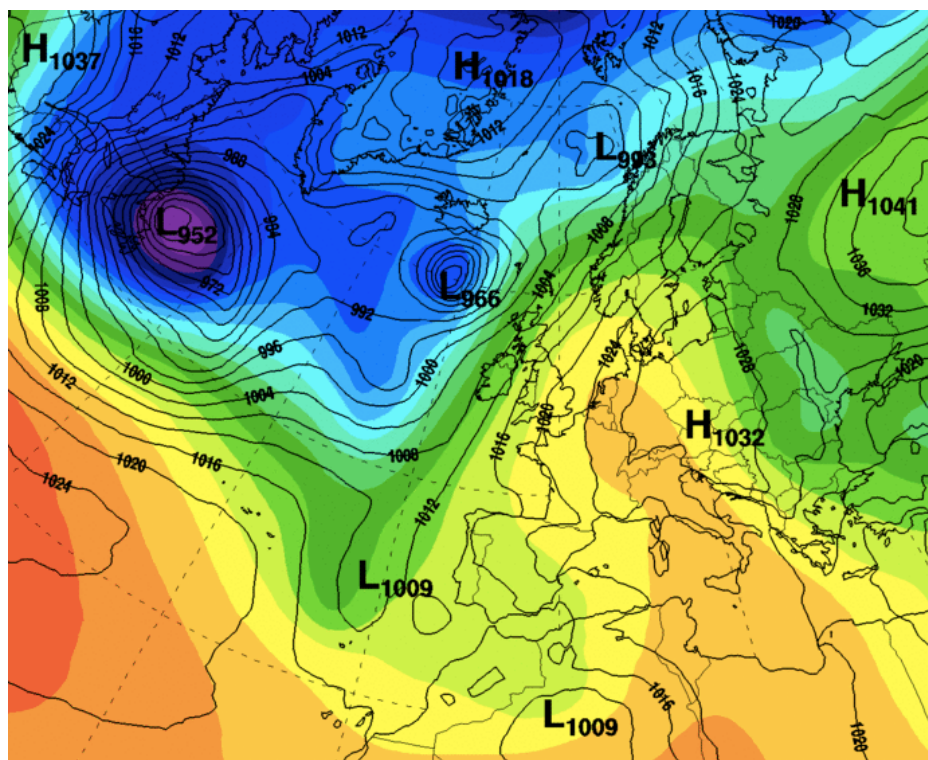
Sondaggi troposferici

Rappresentazione grafica del risultato di un radiosondaggio

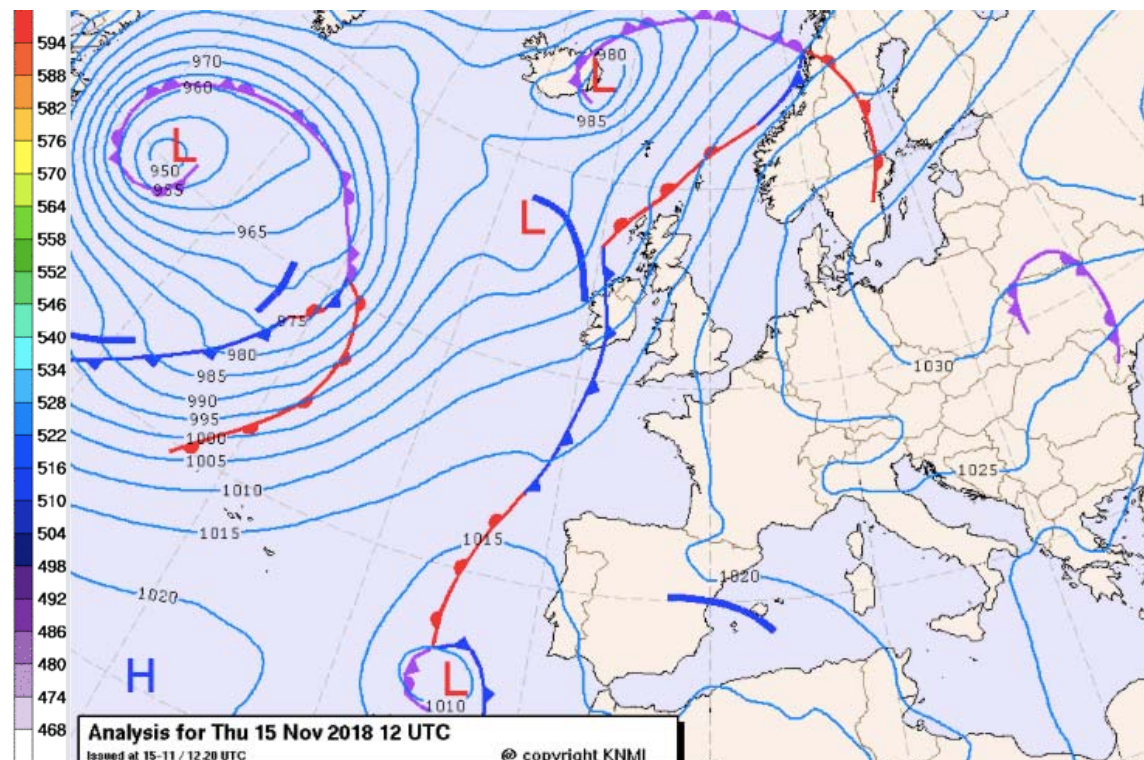
Stazione
Osservazioni in quota
di Milano Linate,
Servizio Meteorol. A.M.



Analisi della situazione meteorologica in superficie e in quota



Analysis Valid on Thu Nov 15 00:00:00 2018
ECMWF-HRES - <http://meteocentre.com/>



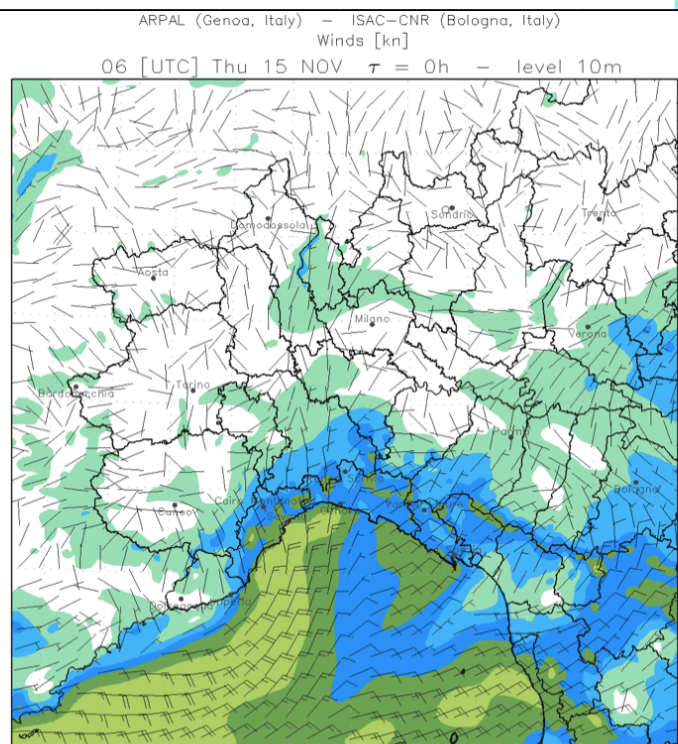
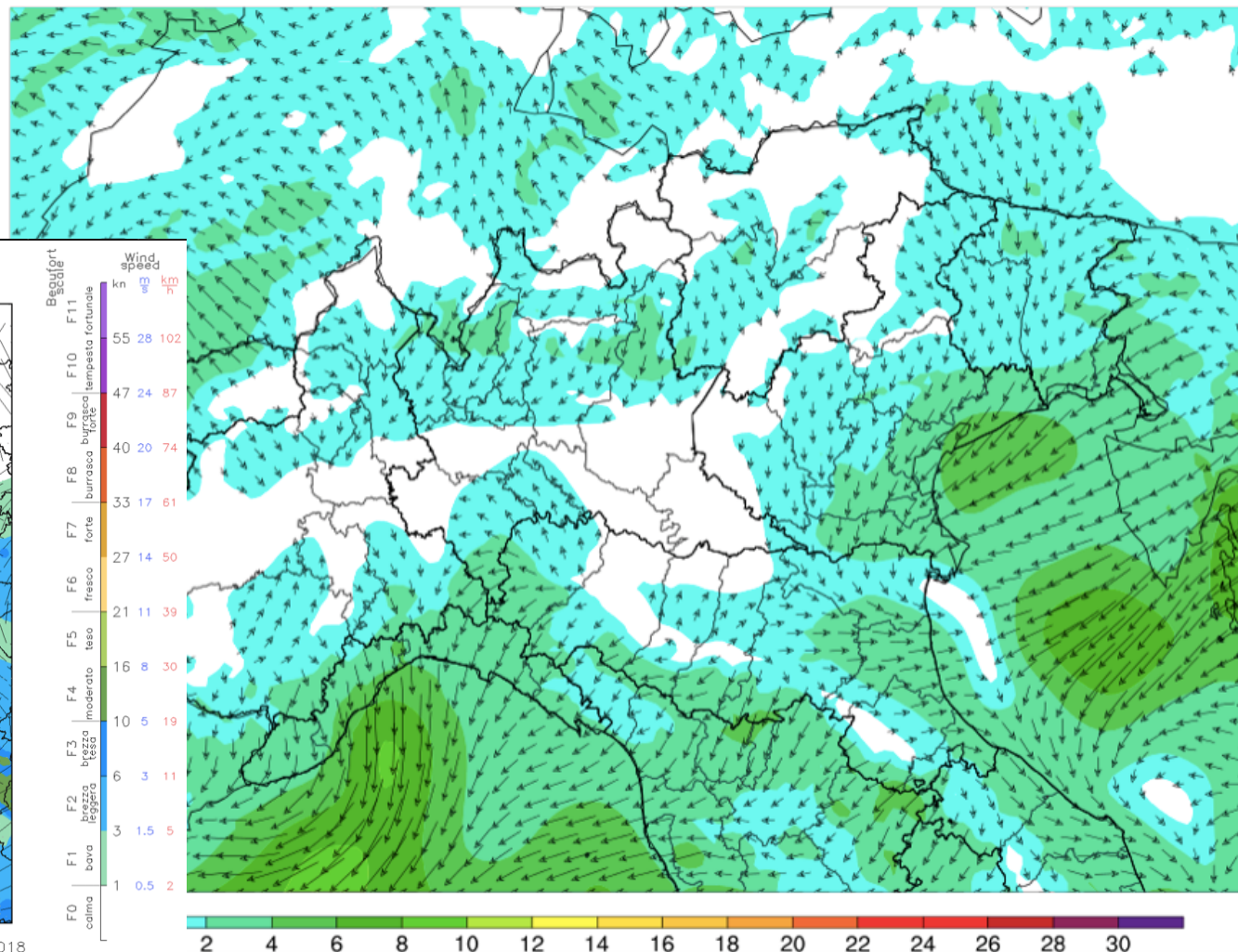
Analysis for Thu 15 Nov 2018 12 UTC
Issued at 15-11 / 12:20 UTC

© copyright KNMI

Mappe di analisi ad alta risoluzione

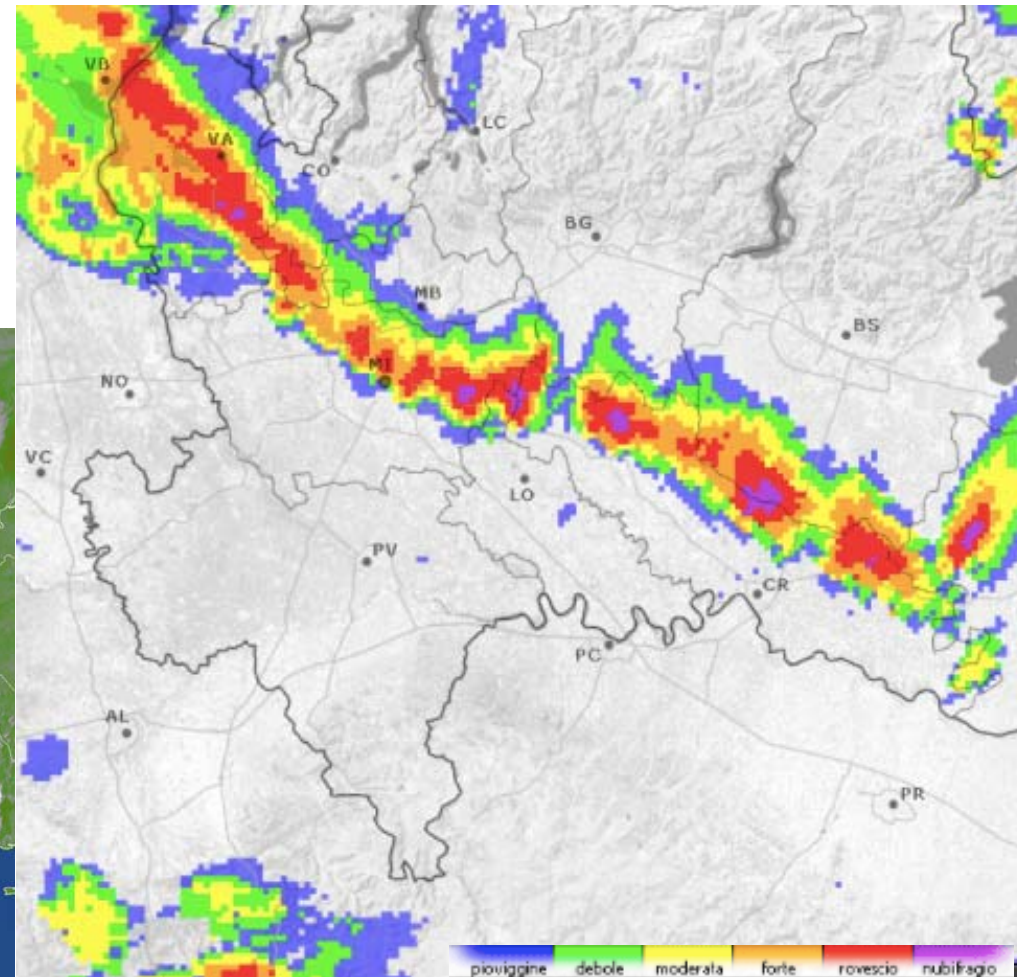
Venti 10m (m/s)

init: 06:00z Thu 15 Nov 2018
valid: 06:00z Thu 15 Nov 2018



Nuvolosità e Precipitazioni

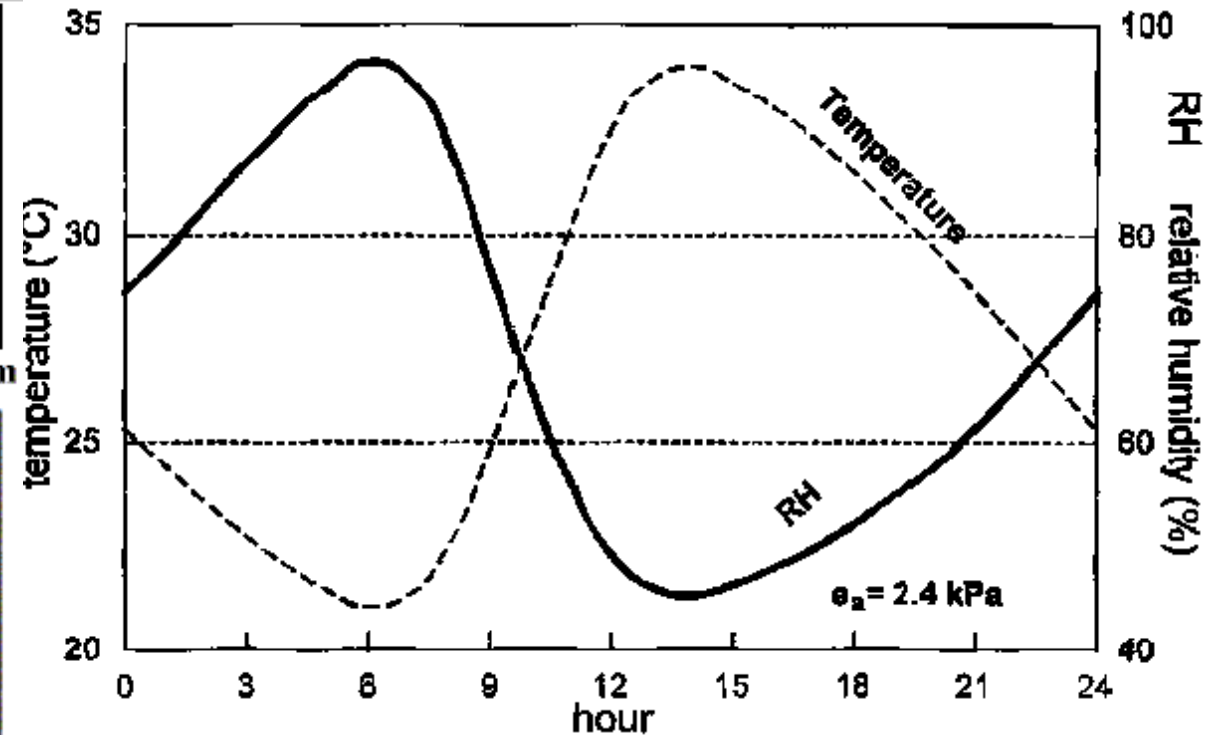
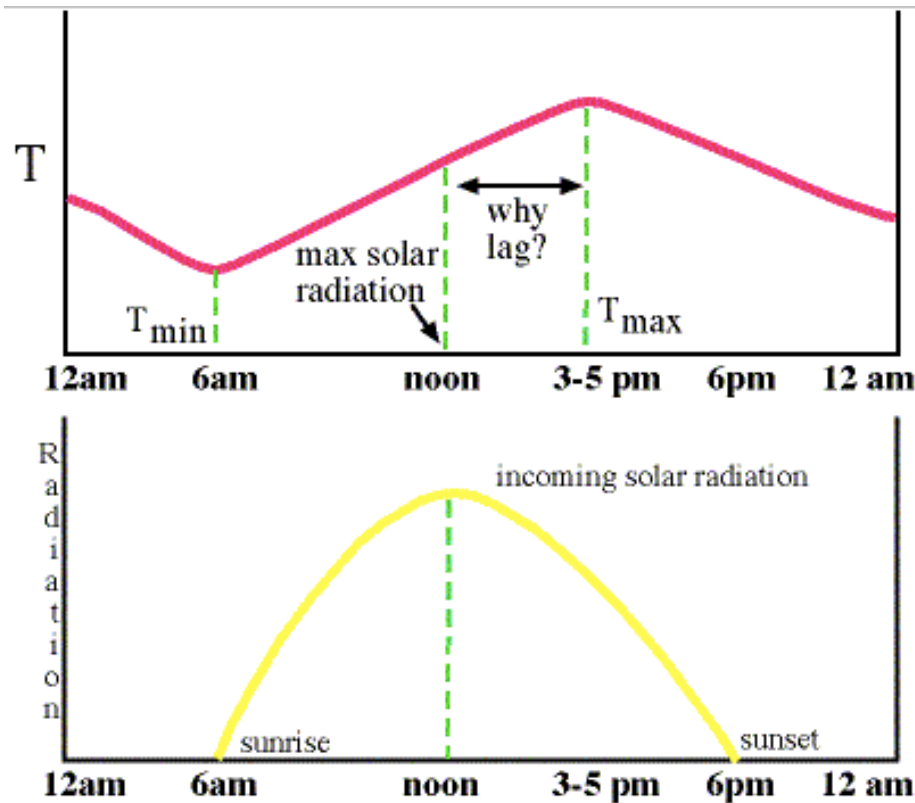
- Radar
- Satelliti



NB: la **nuvolosità** incide sul bilancio radiativo (e quindi termico) istantaneo e locale.

La **precipitazione** produce dilavamento del particolato.

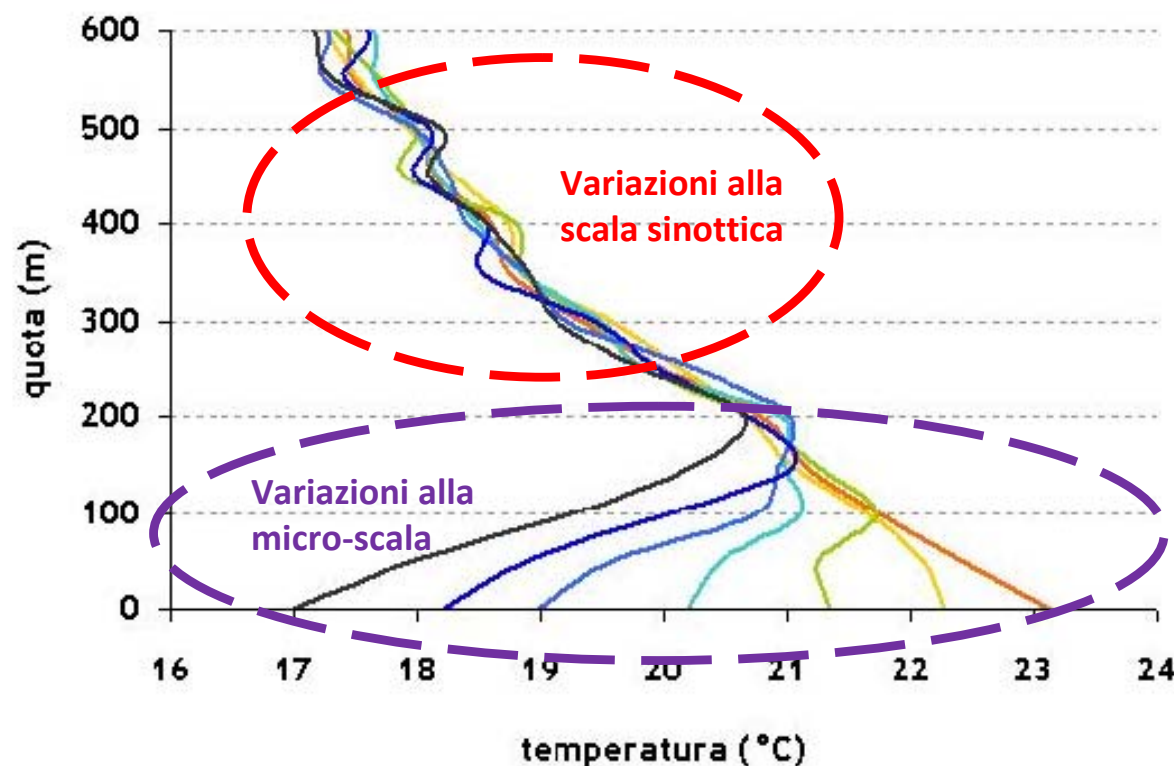
Evoluzione giornaliera nei bassi strati (2÷10 m)



Variazione diurna dei profili verticali di temperatura nei bassi strati

Atmosfera:

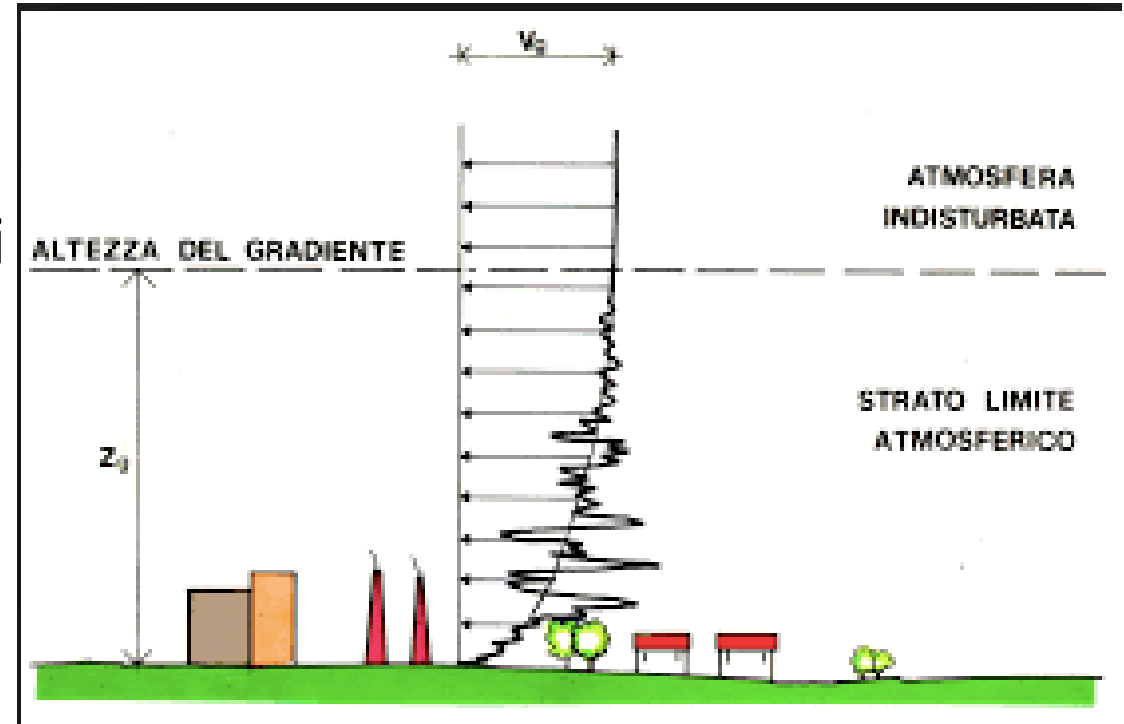
- bassa conducibilità termica
- riscaldata e raffreddata dalla superficie terrestre
- termicamente modificata in quota:
 - dalle avvezioni orizzontali
 - dalle trasformazioni adiabatiche dei moti verticali



Lo strato limite atmosferico

Strato atmosferico inferiore:

- direttamente influenzato dalla superficie terrestre (in tempi brevi)
- rapide fluttuazioni delle variabili fisiche (T, RH, V,...)
- in generale ben rimescolato a causa di shear e turbolenza
- spessore $\approx 10 \div 10^3$ m
- variabile:
 - nel tempo (~ 1 h)
 - nello spazio ($\sim 10^3$ m)



Planetary Boundary Layer (**PBL**)
oppure
Atmospheric Boundary Layer (**ABL**)

Struttura del PBL

Sottostrato viscoso: diffusione molecolare, spessore di pochi millimetri a contatto con la superficie (dove $V = 0$)

Sottostrato turbolento: elevato **shear*** anche con vento debole, vortici turbolenti (3D) cui si può aggiungere la **convezione**; turbolenza dinamica e termica efficaci nel trasferire quantità di moto e calore. Varia tra 30 e 3000 m (in media 1 km).

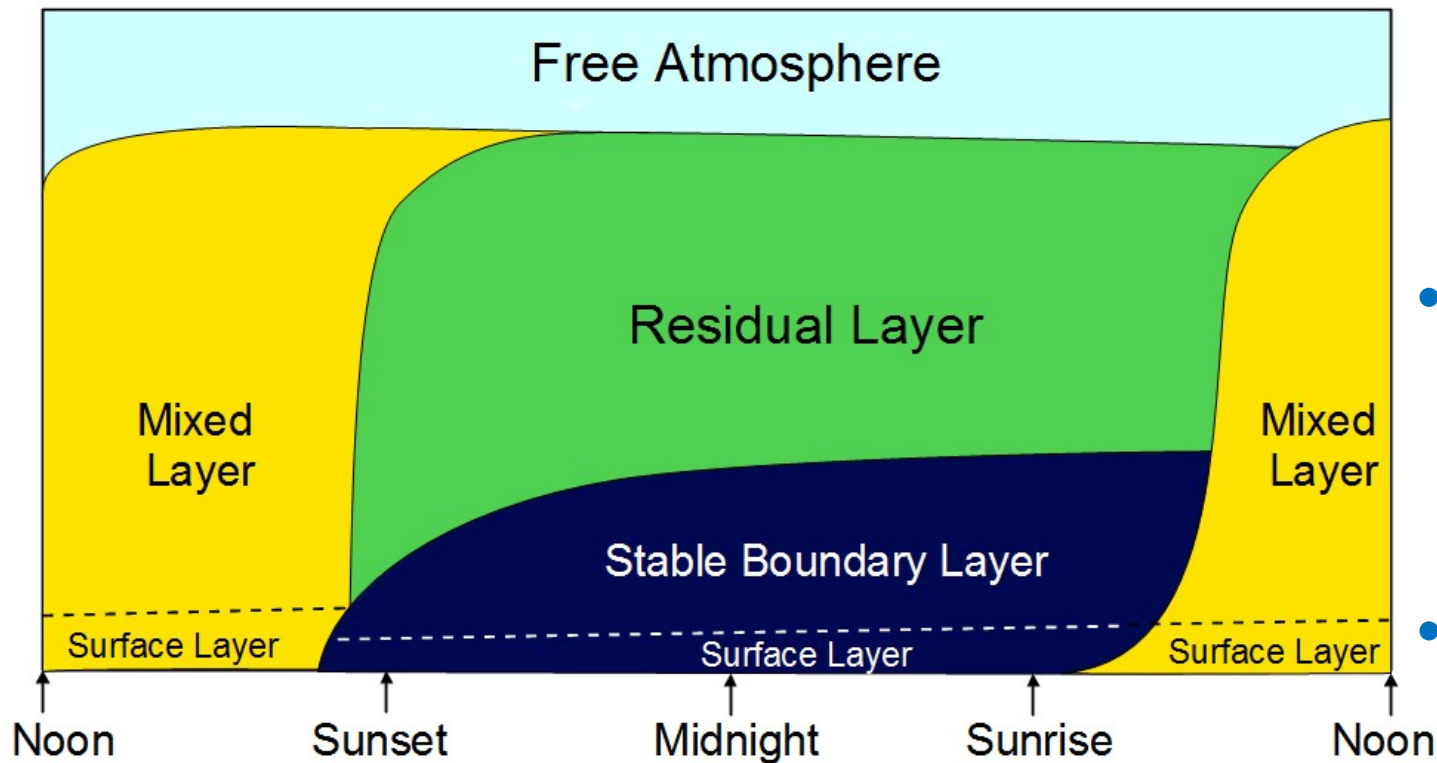
Può essere:

- **stratificato** (SBL: Stratified BL), se agisce solo lo shear, oppure
- **convettivo** (CBL: Convective BL o anche Well Mixed Layer)

NB: Nel PBL le **equazioni del moto** devono tenere conto dei vortici turbolenti.

* **Shear: variazione del modulo e/o della direzione del vettore vento**

Struttura ed evoluzione giornaliera dello strato limite planetario (PBL)



- **Strato rimescolato:** in genere presente e ben sviluppato di giorno, turbolenza e gradienti verticali deboli o nulli.
- **Strato stabile:** si sviluppa dopo il tramonto, è stabile e non rimescolato.
- **Strato residuale:** sovrasta lo strato stabile, è neutro e poco rimescolato.
- **Strato superficiale:** $h_s \lesssim 10\%$ del PBL, presenta forti gradienti verticali e turbolenza.

Strati superiori del PBL: Entrainment e inversione

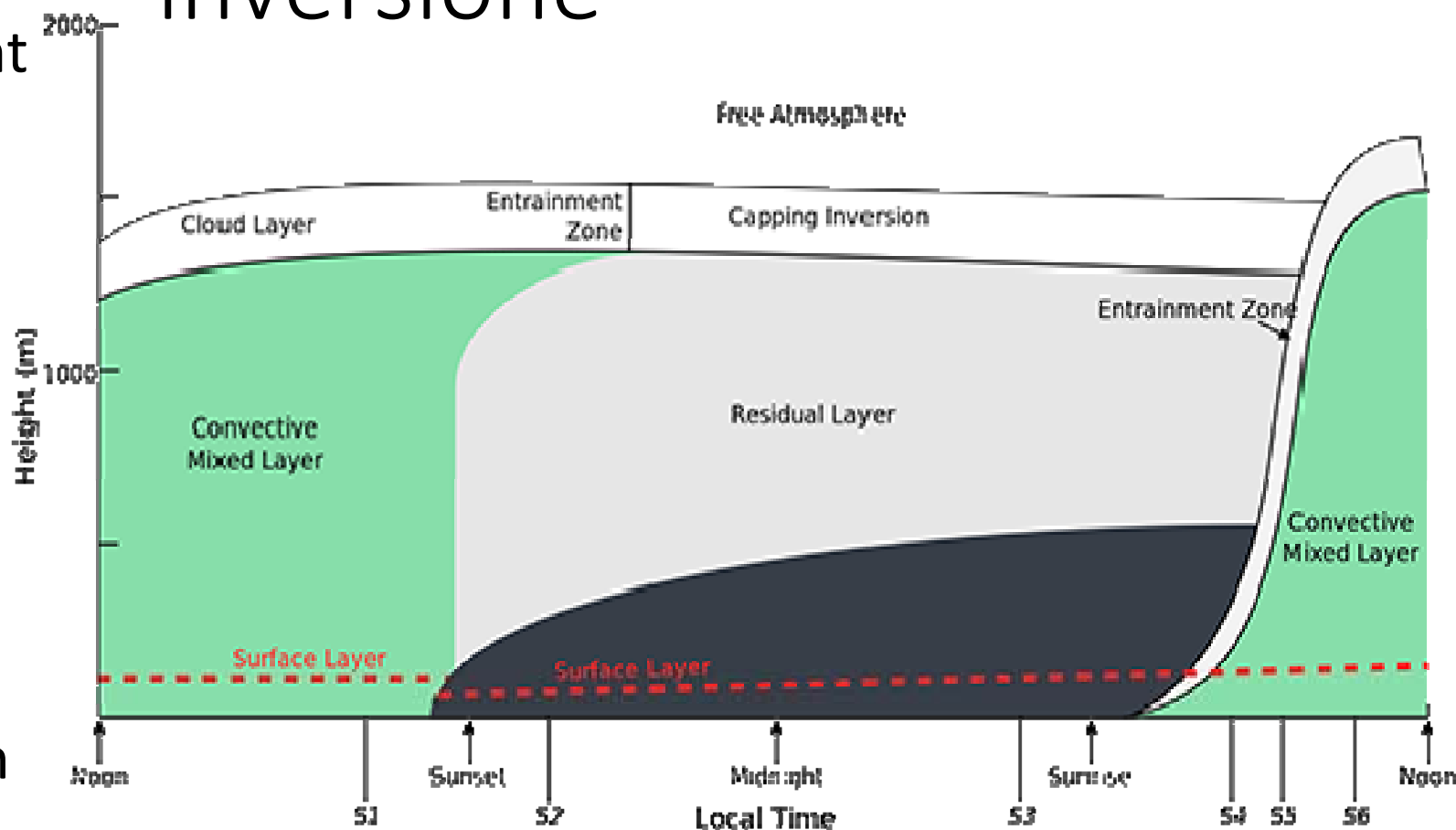
- Entrainment:

Zona di
rimiscelament
o tra libera
atmosfera e
PBL

(con eventuale
formazione di
nubi)

- Capping
inversion:

Inversione (T) in
quota
delimitante il
PBL



Stabilità e instabilità atmosferica

Temperatura potenziale: $\Theta = T \left(\frac{P_0}{P} \right)^{R/c_p}$. con: $P_0 = 1000 \text{ hPa}$ e $R/c_p = 0.286$

- Θ **aumenta** con la quota:

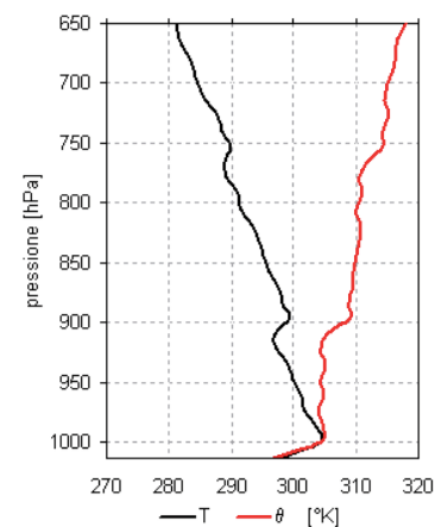
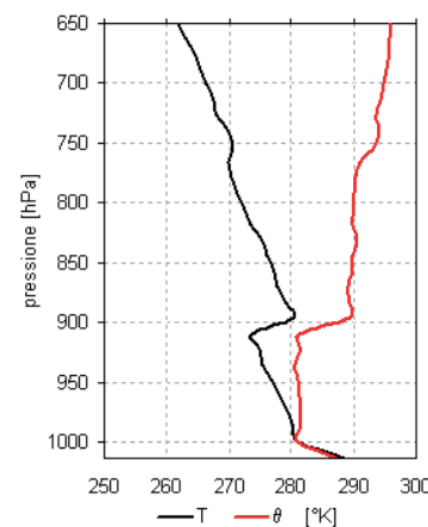
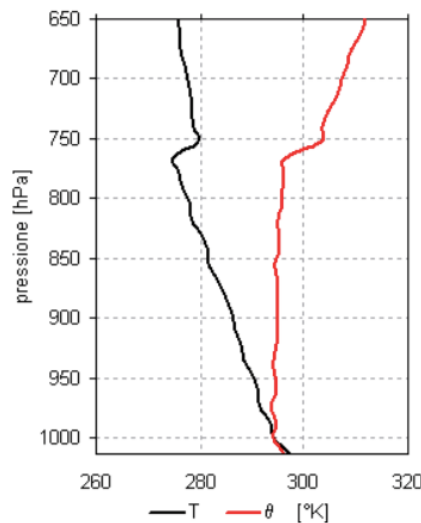
$$\frac{\partial \Theta}{\partial z} > 0$$

stratificazione stabile,
moti verticali inibiti

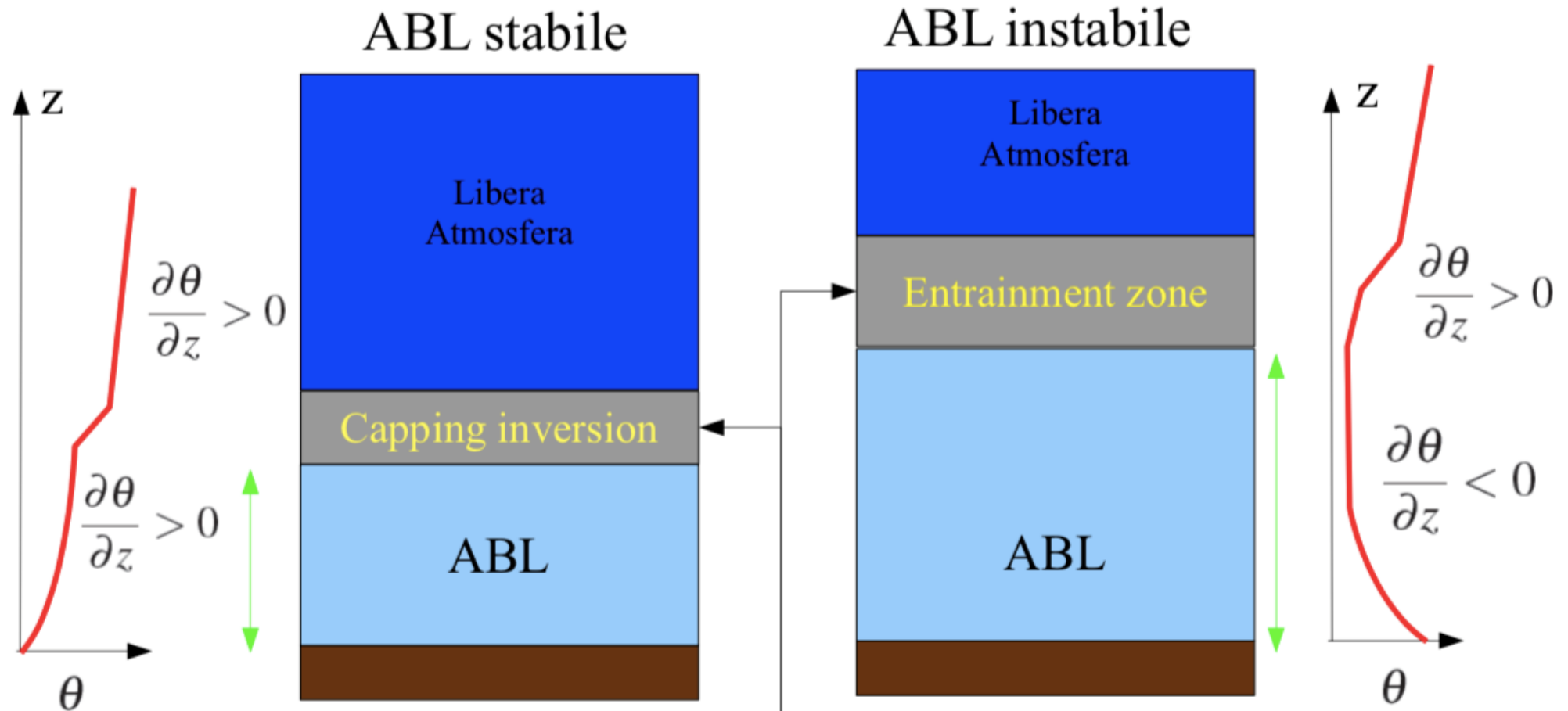
- Θ **diminuisce** con la quo

$$\frac{\partial \Theta}{\partial z} < 0$$

instabilità, convezione e
conseguente **rimescolamento**

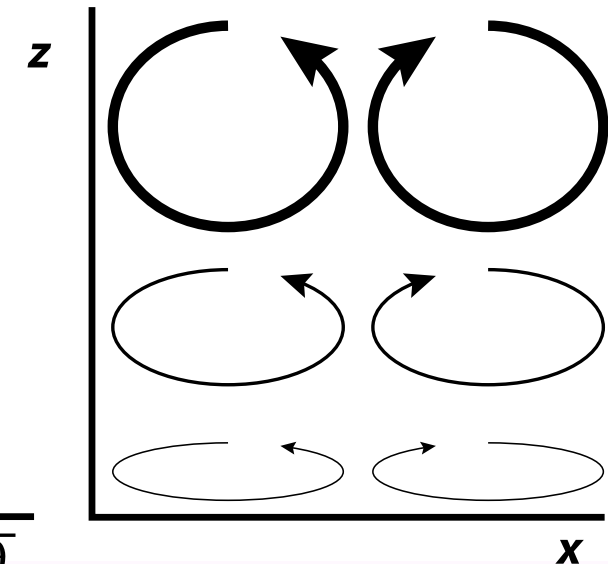
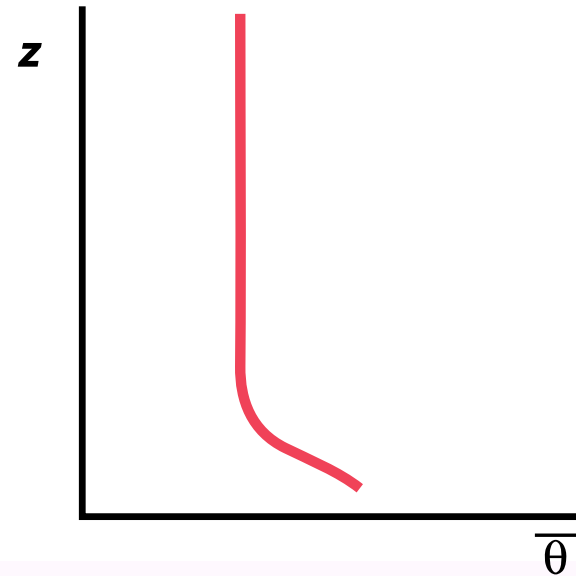


Struttura dello strato limite stabile/instabile

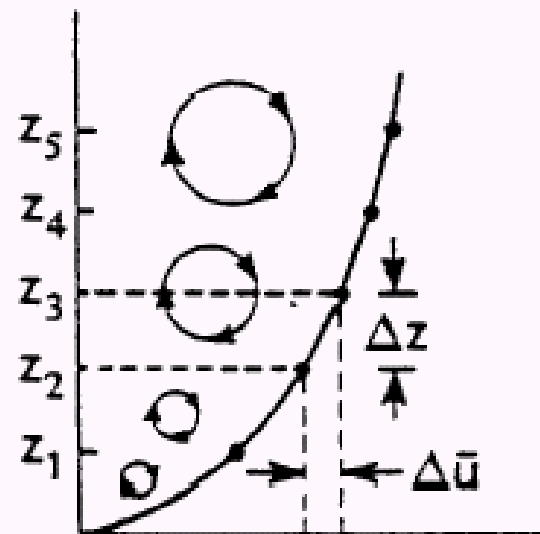


Vortici turbolenti

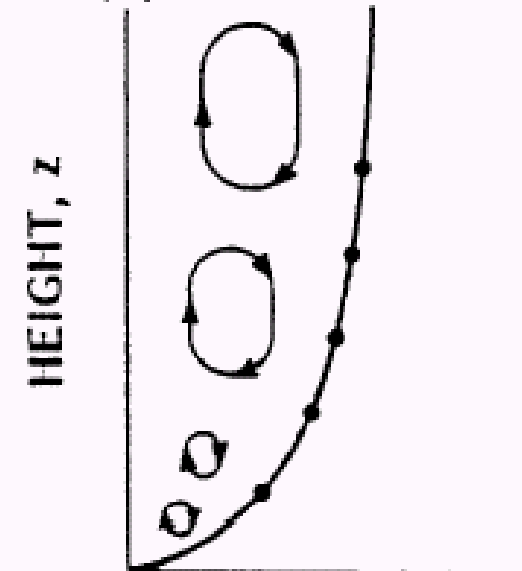
- Vortici da shear prodotti in vicinanza della superficie di limitate dimensioni
- In condizioni neutre o di instabilità si propagano verso l'alto aumentando di grandezza, trasformandosi in convezione nel CBL



(b) *Neutral*

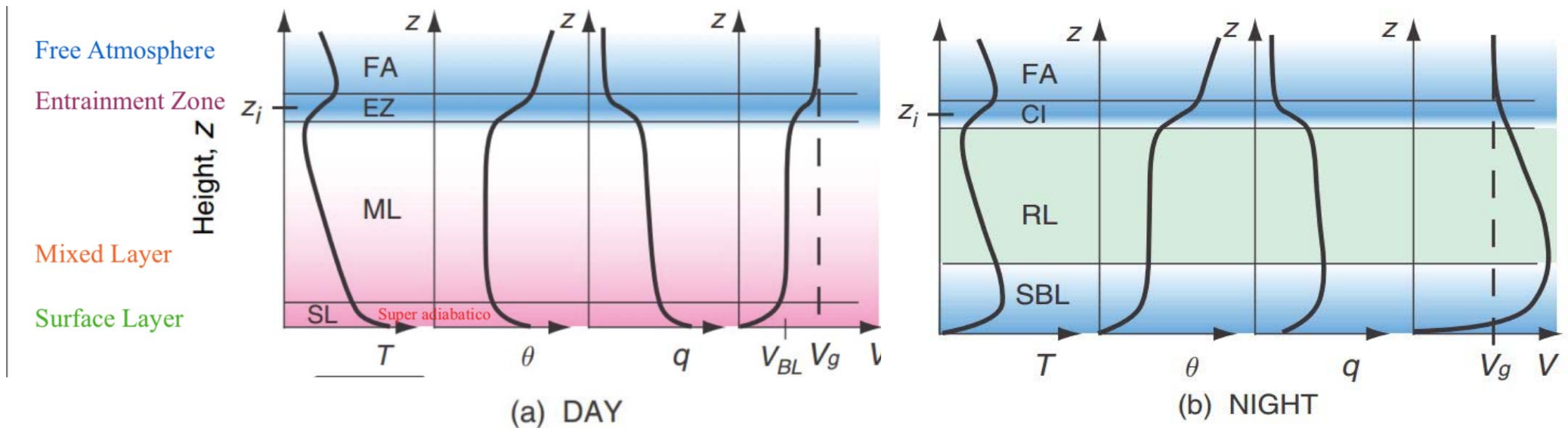


(c) *Unstable*

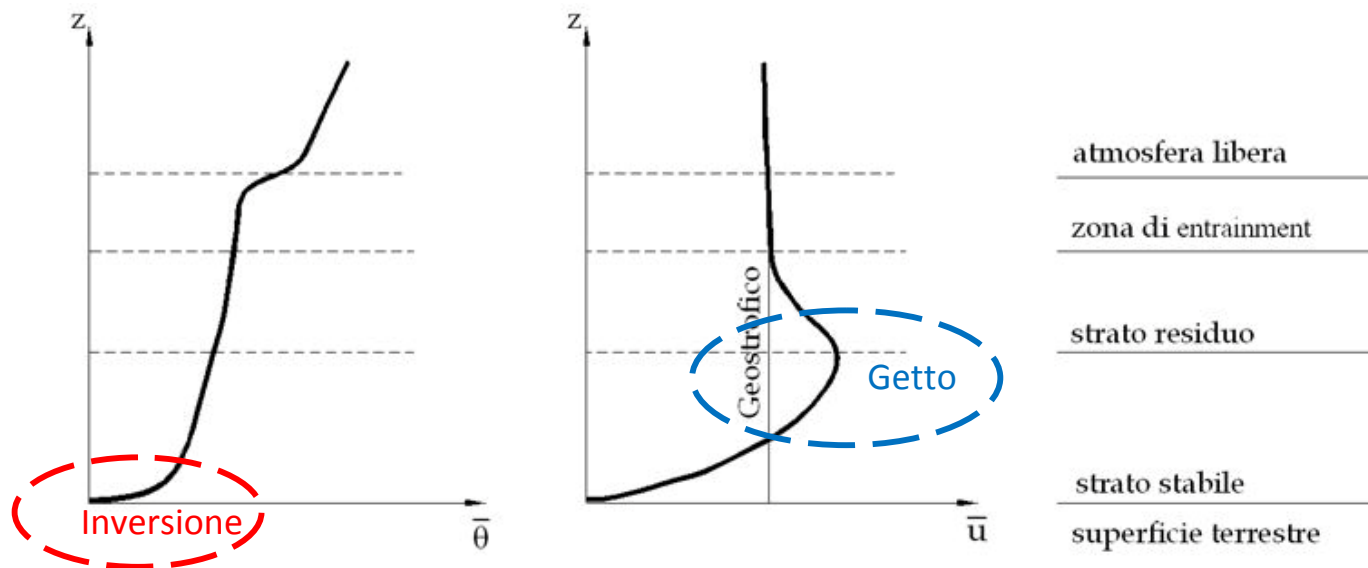


Profili verticali nel PBL

- V : vento medio
- V_g : vento geostrofico(nella libera atmosfera)
- q : umidità specifica
- θ : temperatura potenziale



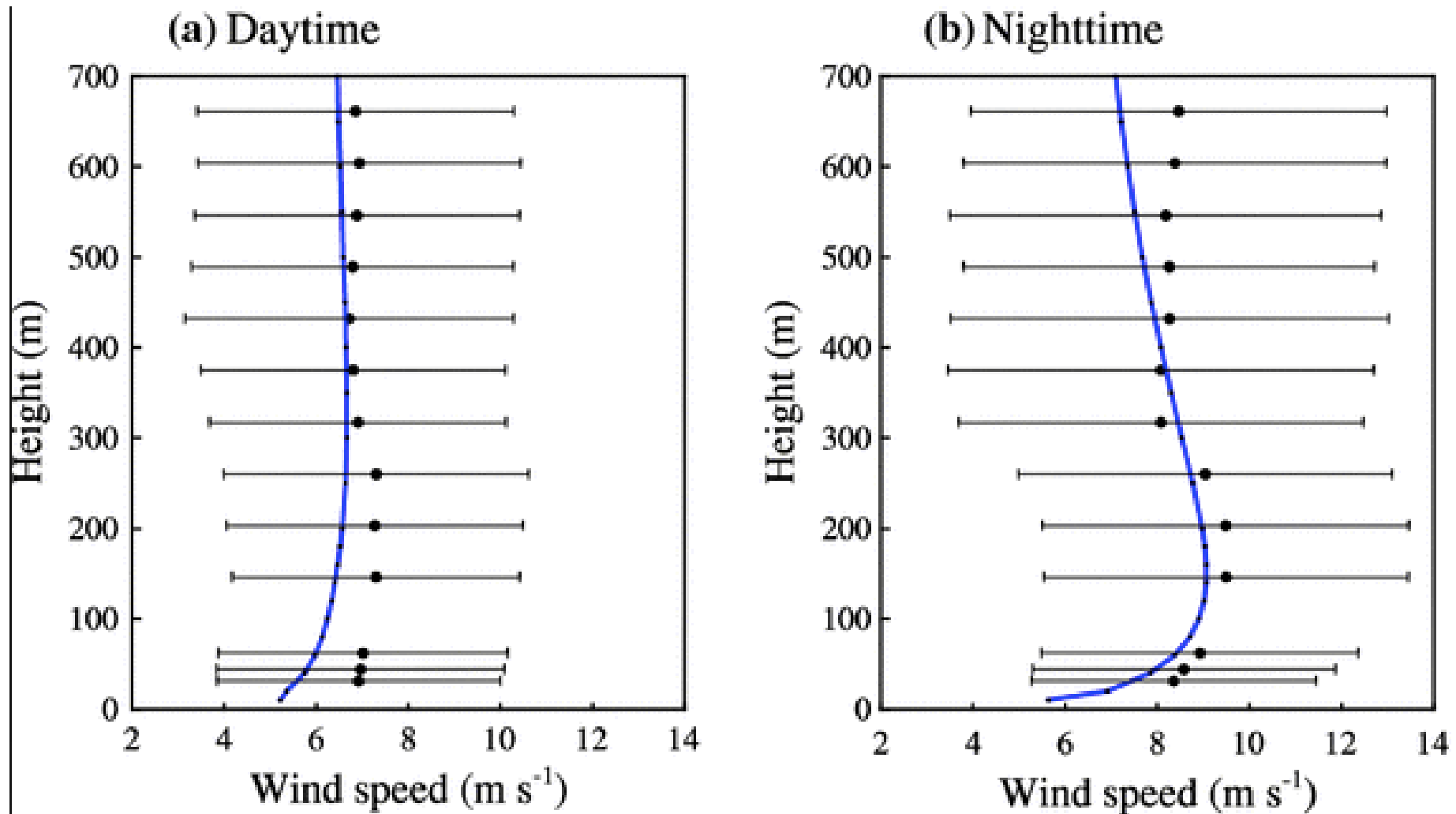
Condizioni di stabilità nei bassi strati



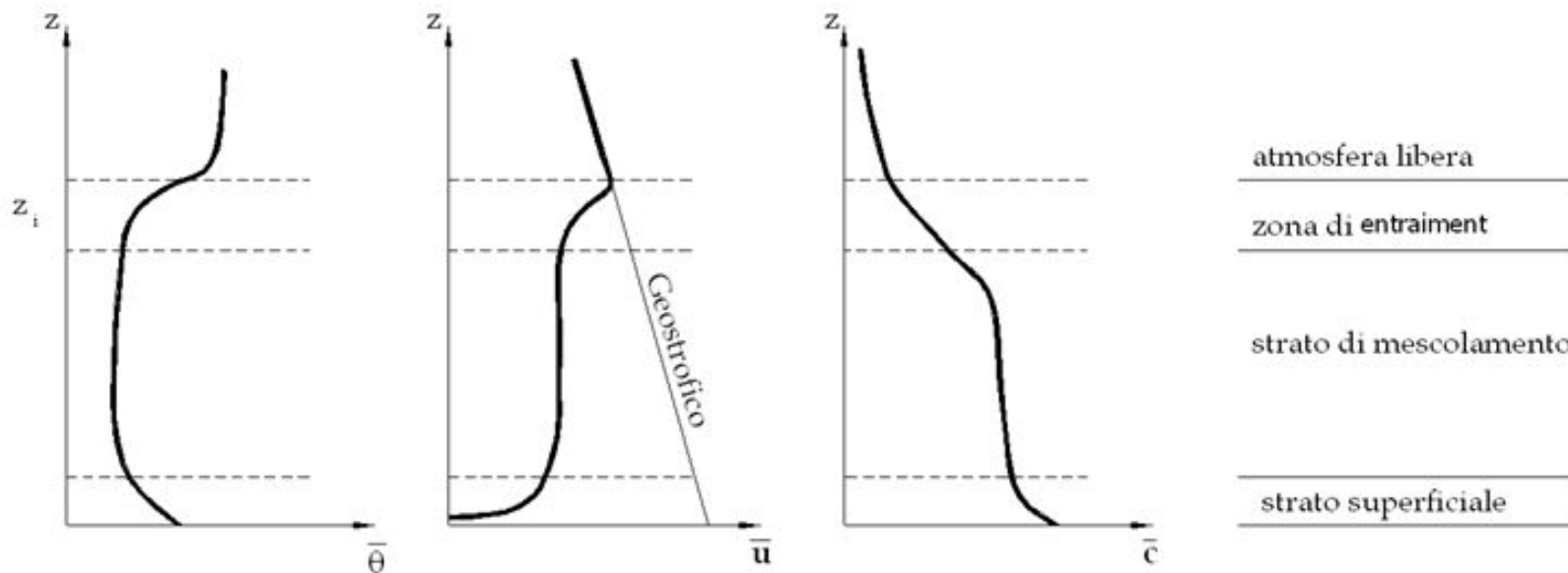
Di notte: la parte inferiore dello strato residuo viene trasformata, per raffreddamento al contatto con il terreno, in uno strato stabile con sporadica turbolenza, caratterizzato da **inversione** del profilo della temperatura e **stratificazione**.

Un fenomeno caratteristico di questa zona è la possibile esistenza di accelerazioni del vento sub-geostrofico (**getto**).

Profili verticali del vento



Condizioni di instabilità nei bassi strati



Di giorno: dopo l'alba il mixed layer cresce e aumenta la turbolenza, raggiungendo il massimo spessore nel primo pomeriggio. La presenza di turbolenza (convettiva) rende uniformi con la quota umidità e temperatura, rimescolando vapore e inquinanti.

Lo strato superiore dello strato di mescolamento è in genere molto stabile (**inversione**) e blocca la risalita di vapore e inquinanti (zona di **entrainment**, con eventuale condensazione e formazione di nubi).

Fenomeni diffusivi

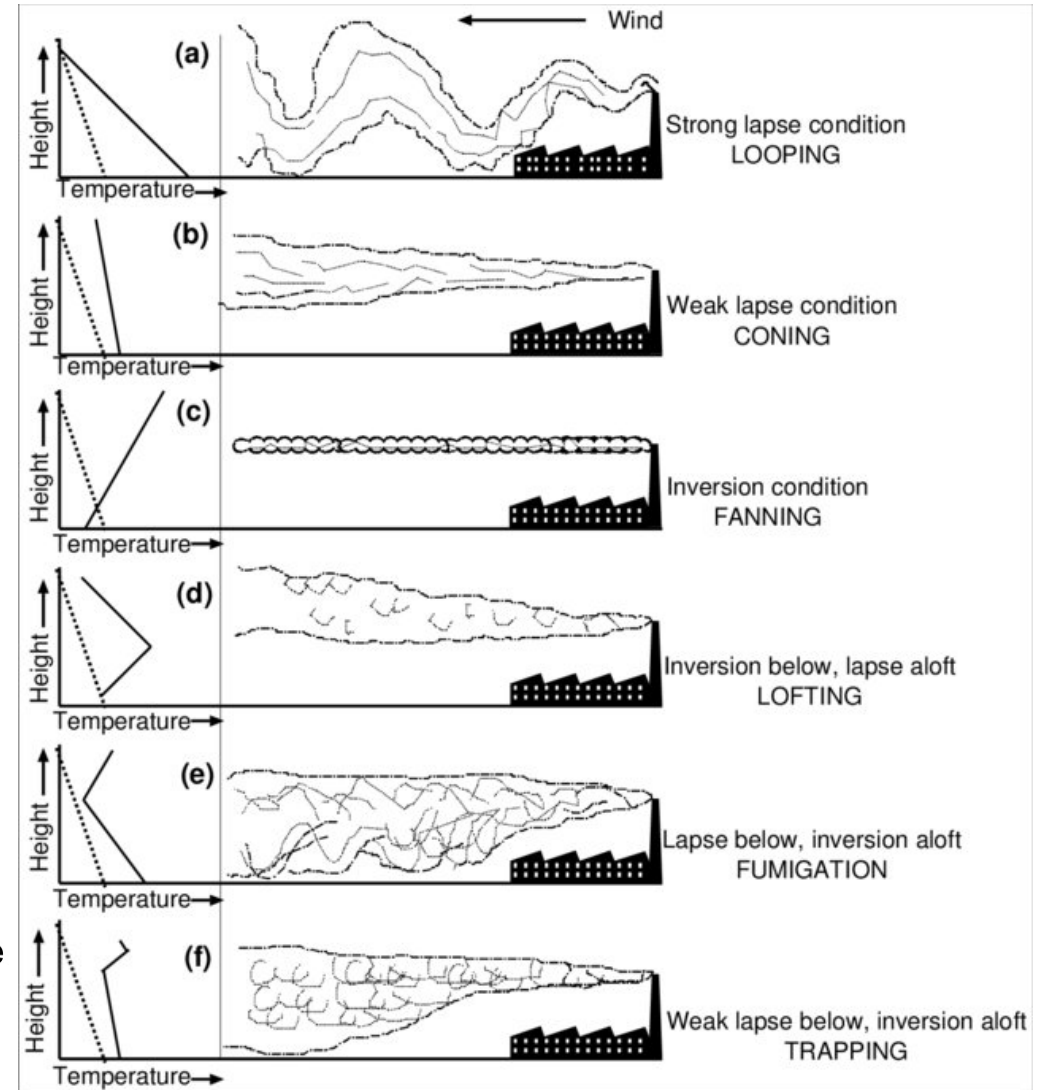
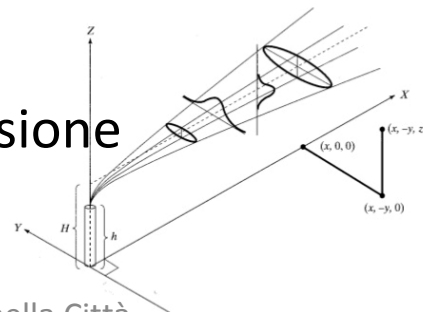
- Da sorgenti puntiformi elevate:

- Sottovento, con dispersione laterale, in funzione del vento
- In caso di instabilità, dipende dall'intensità della stessa
- In caso di stabilità dipende dall'altezza della sorgente rispetto alla quota dell'inversione

- Da sorgenti (anche estese) superficiali:

- Come sopra, ma sempre sotto l'eventuale inversione

Point Source Gaussian Plume Model



Equazioni del moto turbolento

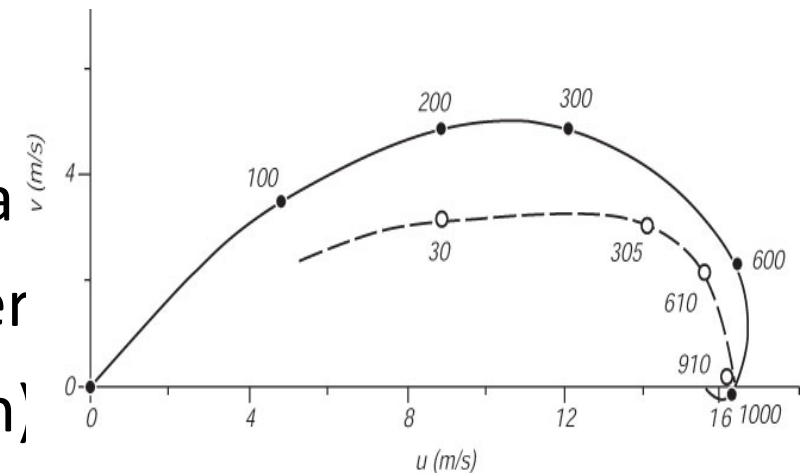
(1)

Le equazioni del moto nell'approssimazione geostrofica si riducono a:

$$\underline{u} - u_g = -f^{-1} * (\partial/\partial z) (\underline{v'w'}) \quad ; \quad \underline{v} - v_g = +f^{-1} * (\partial/\partial z) (\underline{u'w'})$$

dove $(\underline{v'w'})$ e $(\underline{u'w'})$ sono le covarianze delle componenti turbolente del vento che possono essere parametrizzate.

- Nello **strato turbolento e convettivo (CBL)** queste sono calcolabili dall'intensità del vento moltiplicato per un coefficiente d'attrito (drag) e il vento risulta essere inferiore a quello geostrofico e **costante** con la quota.
- Nello **strato turbolento e stratificato (SBL)** per la parametrizzazione si usa la lunghezza di rimescolamento (Prandtl) e si ottiene per il vento la spirale di Ekman (strato di Ekman)

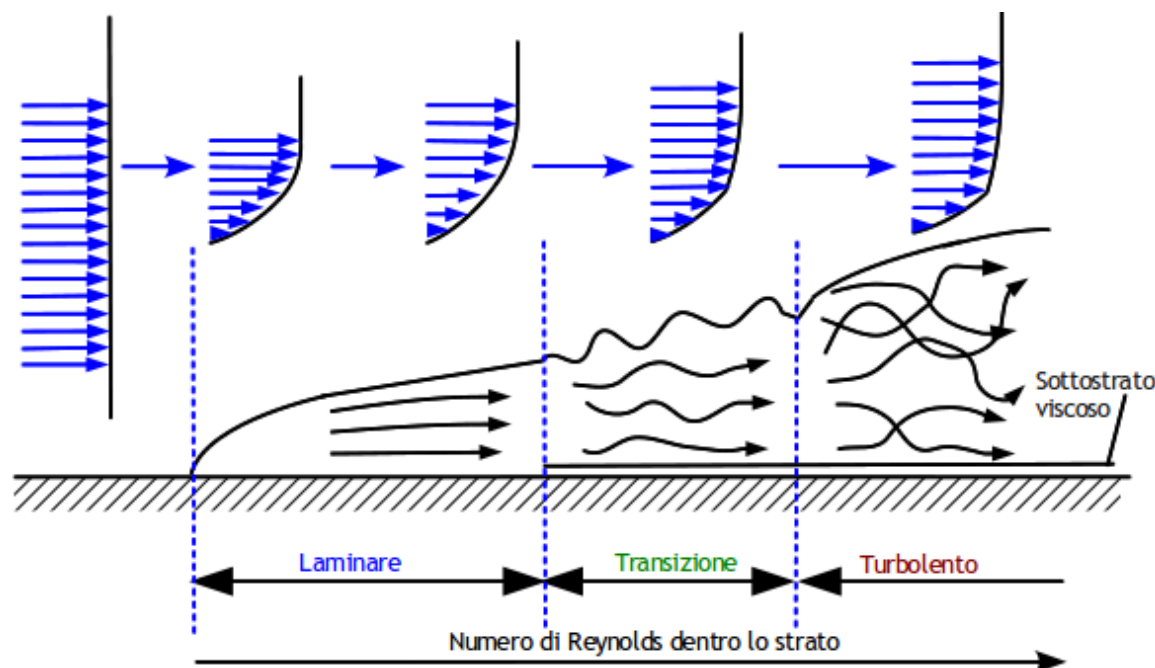


Equazioni del moto turbolento (2)

- Nella parte inferiore del SBL, detta **strato superficiale (SL)**, dove l'effetto del vento geostrofico è trascurabile rispetto alla turbolenza, la parametrizzazione è data dalla velocità d'attrito (friction velocity):

$$u_*^2 = |(\underline{u'} \underline{w'})_s|$$

e si ottiene un profilo verticale del vento di tipo logaritmico.



Diapositiva 30

GF3

Inserisci equazioni

Giu Frust; 27/11/2018

Stima delle condizioni di stabilità nei bassi strati: le classi di Pasquill

Table 1: The Pasquill stability classes

Stability class	Definition	Stability class	Definition
A	very unstable	D	neutral
B	unstable	E	slightly stable
C	slightly unstable	F	stable

Table 2: Meteorological conditions that define the Pasquill stability classes

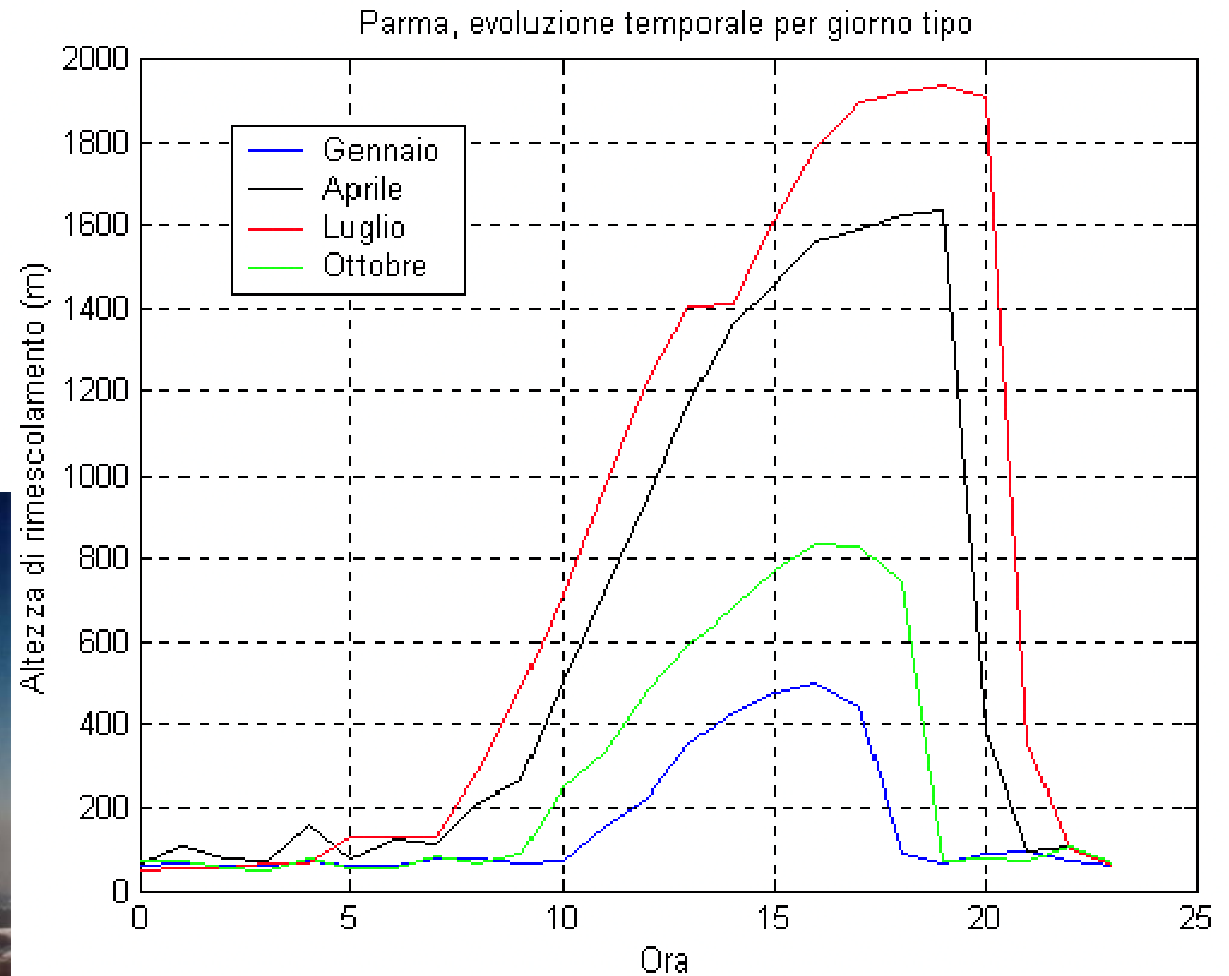
Surface windspeed		Daytime incoming solar radiation			Nighttime cloud cover	
m/s	mi/h	Strong	Moderate	Slight	> 50%	< 50%
< 2	< 5	A	A – B	B	E	F
2 – 3	5 – 7	A – B	B	C	E	F
3 – 5	7 – 11	B	B – C	C	D	E
5 – 6	11 – 13	C	C – D	D	D	D
> 6	> 13	C	D	D	D	D

Note: Class D applies to heavily overcast skies, at any windspeed day or night

Incoming solar radiation is based on the following: strong ($> 700 \text{ W m}^{-2}$), moderate ($350\text{-}700 \text{ W m}^{-2}$), slight ($< 350 \text{ W m}^{-2}$)^[13]

Altezza dello strato rimescolato

Determinante per la diffusione di vapore e inquinanti!



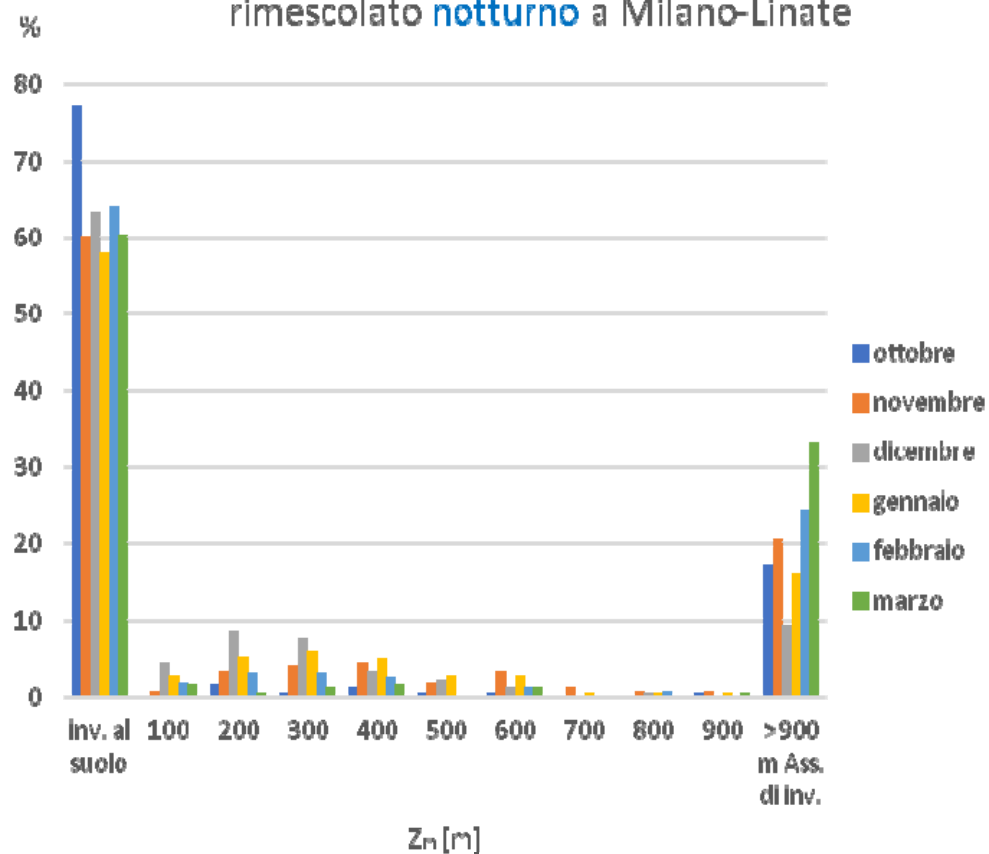
Metodi per la determinazione dell'altezza dello strato rimescolato

- Metodi analitici
 - Modelli del PBL
 - Parametrizzazioni
- Metodi di misura
 - Stazioni al suolo (Torri)
 - Radiosondaggi
 - Telerilevamento (Sodar, Rass, Lidar)

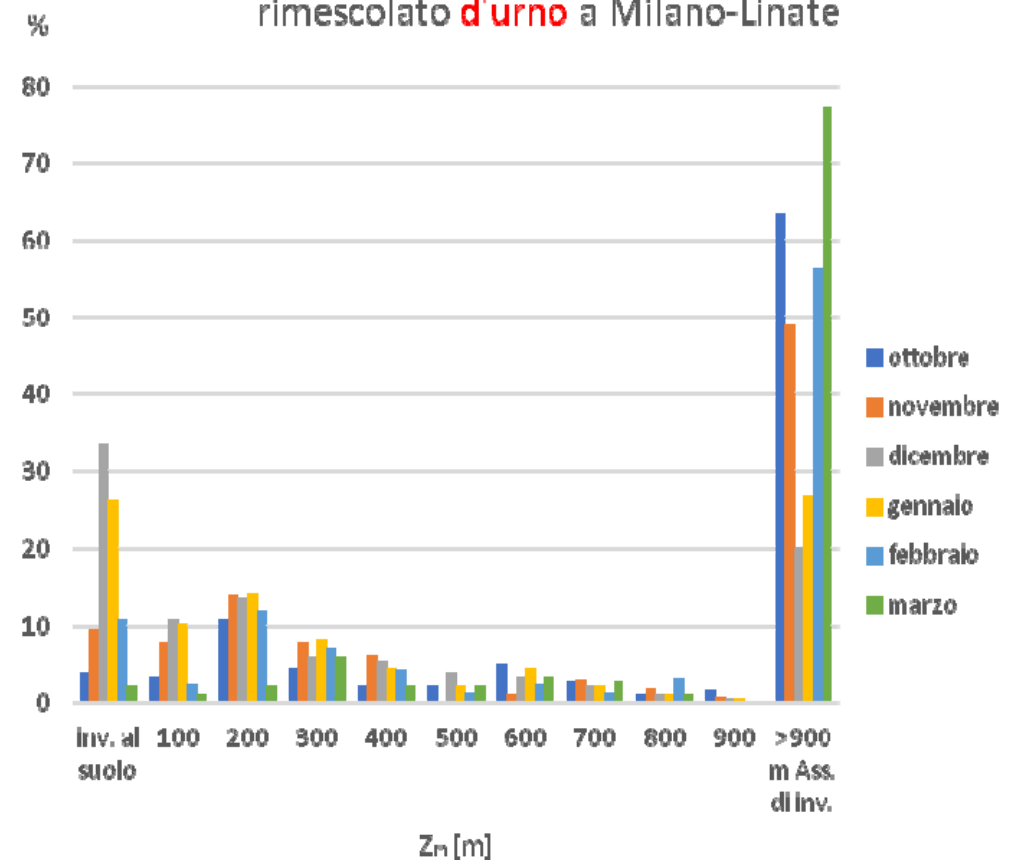
NB: incertezze dell'ordine del 10%

Climatologia dell'altezza dello strato rimescolato a Milano-Linate

Frequenze percentuali dell'altezza dello strato rimescolato **notturno** a Milano-Linate



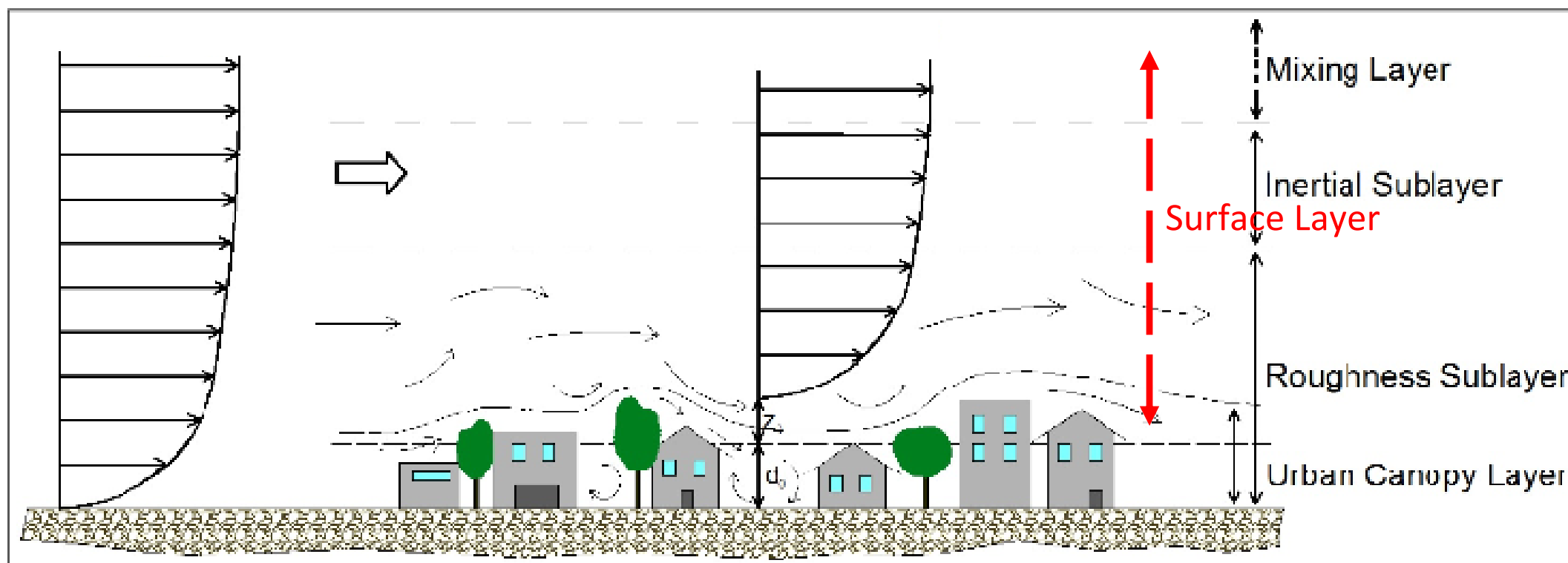
Frequenze percentuali dell'altezza dello strato rimescolato **d'urno** a Milano-Linate



Dall'ambiente rurale all'ambiente urbano

L'aumento della “rugosità superficiale” crea nuove stratificazioni nella parte inferiore del PBL (Surface Layer):

Inertial -, Roughness -, Urban Canopy Sublayer



Le scale dello strato limite in ambiente urbano (UBL)

- **PBL**

- **ML**

- **SL**

- **Rural BL**

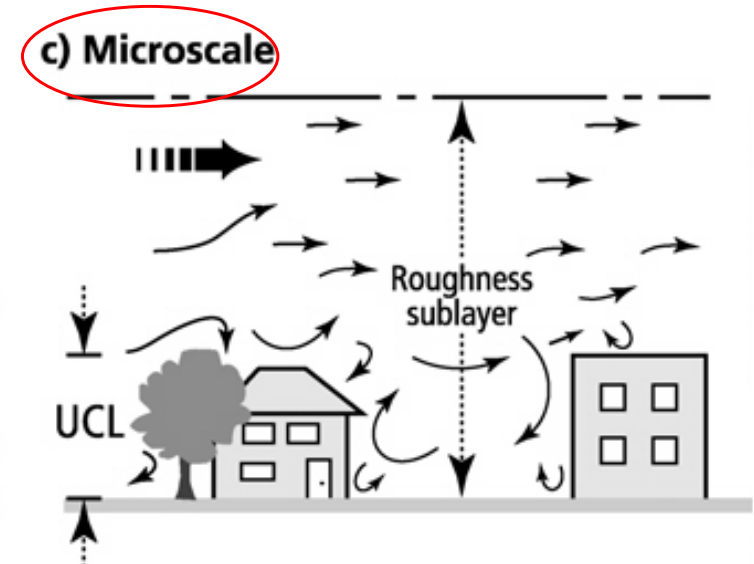
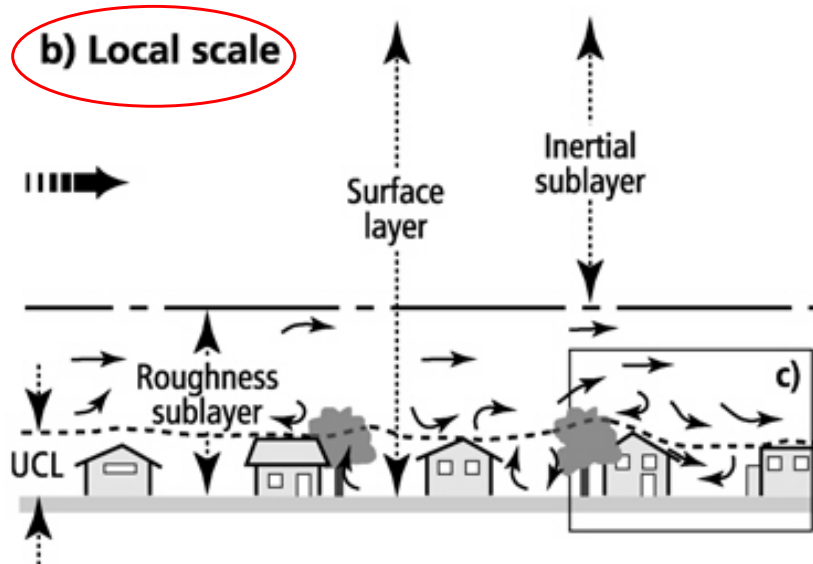
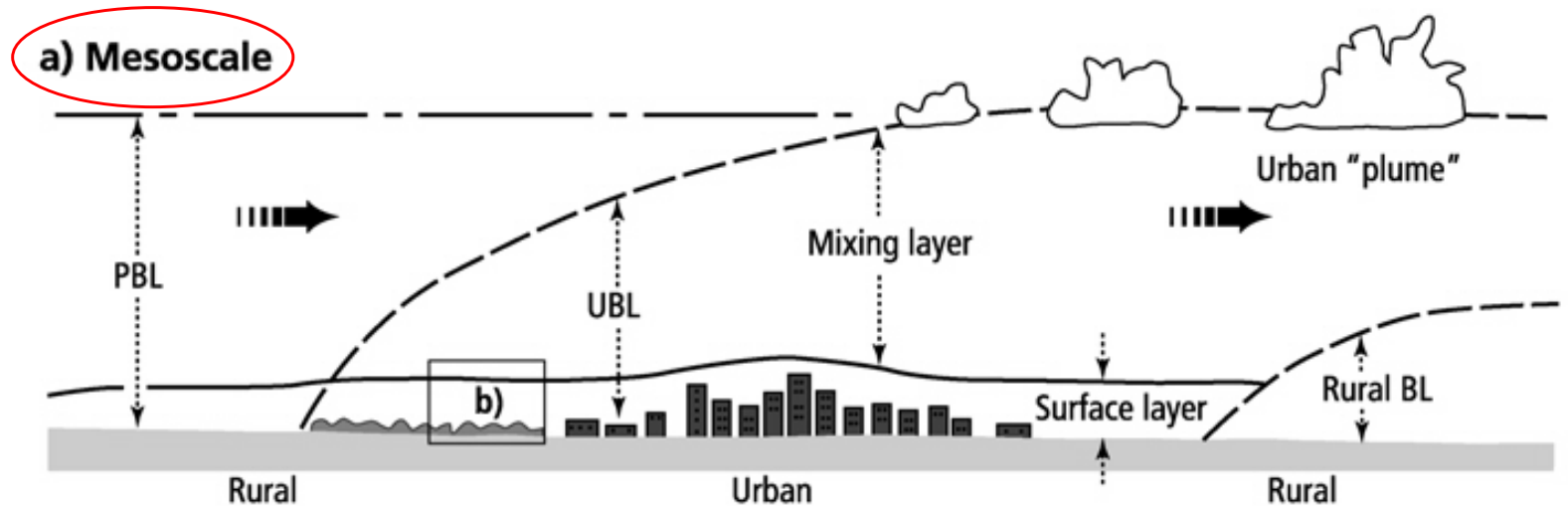
- **UBL**

- **ISL**

- **RSL**

- **UCL**

- **Urban Plume/
Dome**



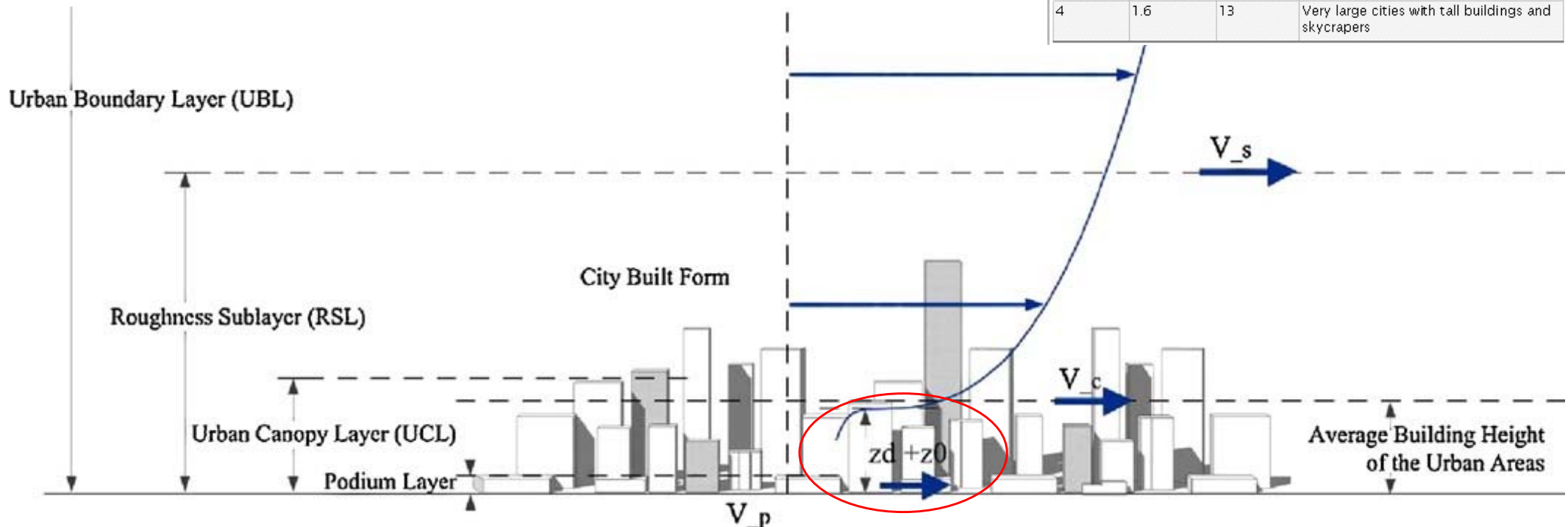
L'atmosfera urbana

(Urban Boundary Layer: UBL)

- Caratteristiche verticali della superficie urbanizzata:

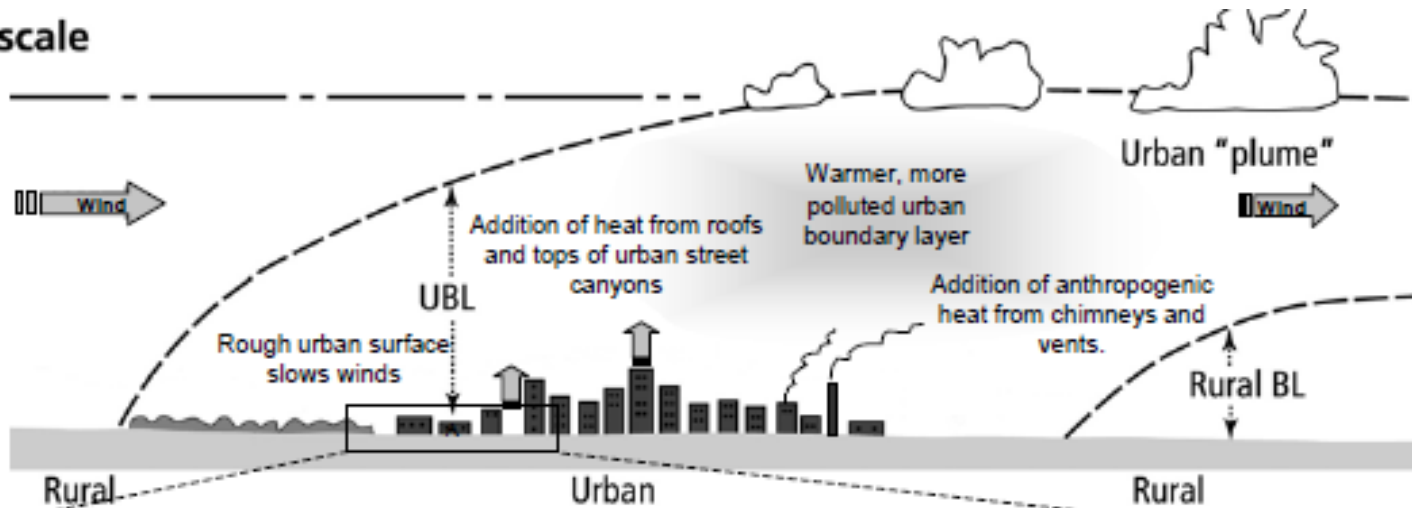
- Z_0 : roughness length (Lunghezza di rugosità, $V=0$)
- Z_d : displacement height (altezza dell'involuppo edificato o "canopy")

Roughness Classes and Roughness Length Table			
Roughness Class	Roughness Length m	Energy Index (per cent)	Landscape Type
0	0.0002	100	Water surface
0.5	0.0024	73	Completely open terrain with a smooth surface, e.g. concrete runways in airports, mowed grass, etc.
1	0.03	52	Open agricultural area without fences and hedgerows and very scattered buildings. Only softly rounded hills
1.5	0.055	45	Agricultural land with some houses and 8 metre tall sheltering hedgerows with a distance of approx. 1250 metres
2	0.1	39	Agricultural land with some houses and 8 metre tall sheltering hedgerows with a distance of approx. 500 metres
2.5	0.2	31	Agricultural land with many houses, shrubs and plants, or 8 metre tall sheltering hedgerows with a distance of approx. 250 metres
3	0.4	24	Villages, small towns, agricultural land with many or tall sheltering hedgerows, forests and very rough and uneven terrain
3.5	0.8	18	Larger cities with tall buildings
4	1.6	13	Very large cities with tall buildings and skyscrapers

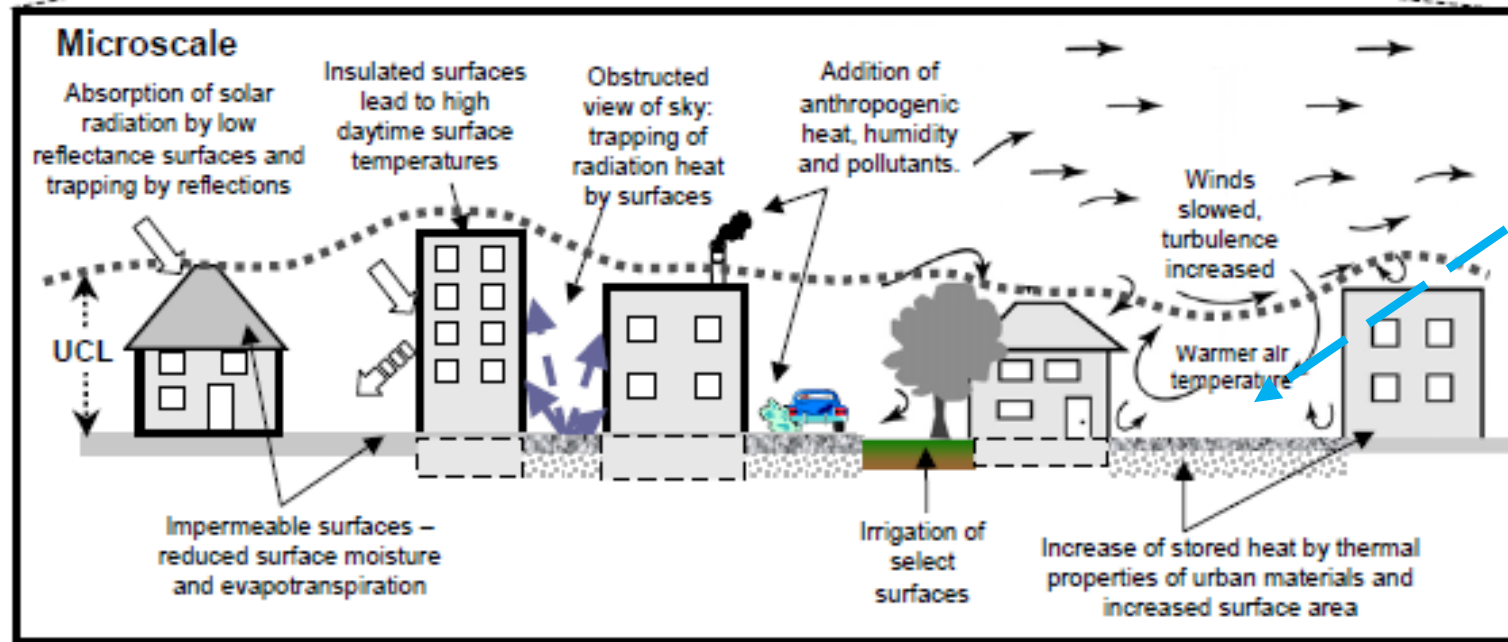


Struttura e processi nell'UBL

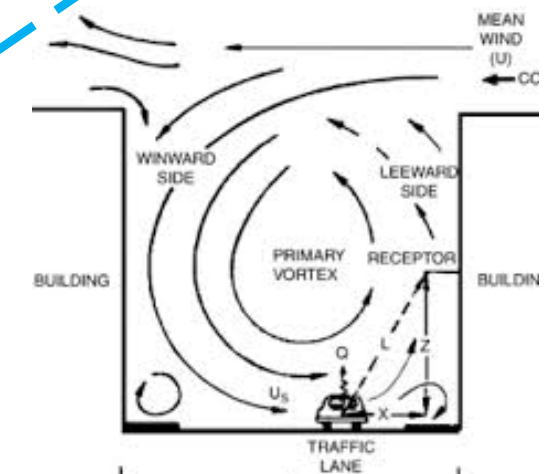
Mesoscale



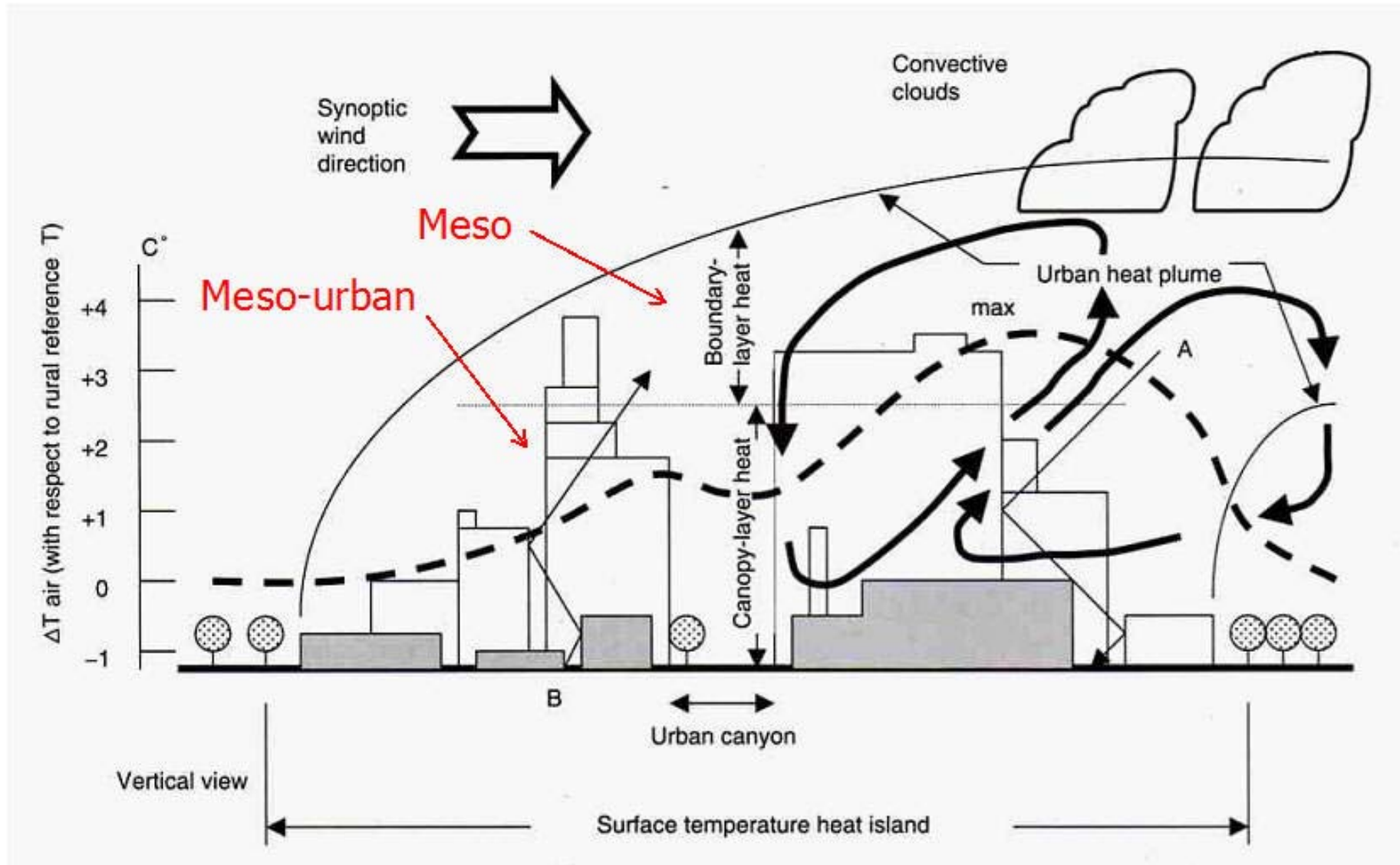
Microscale



"Urban canyons"



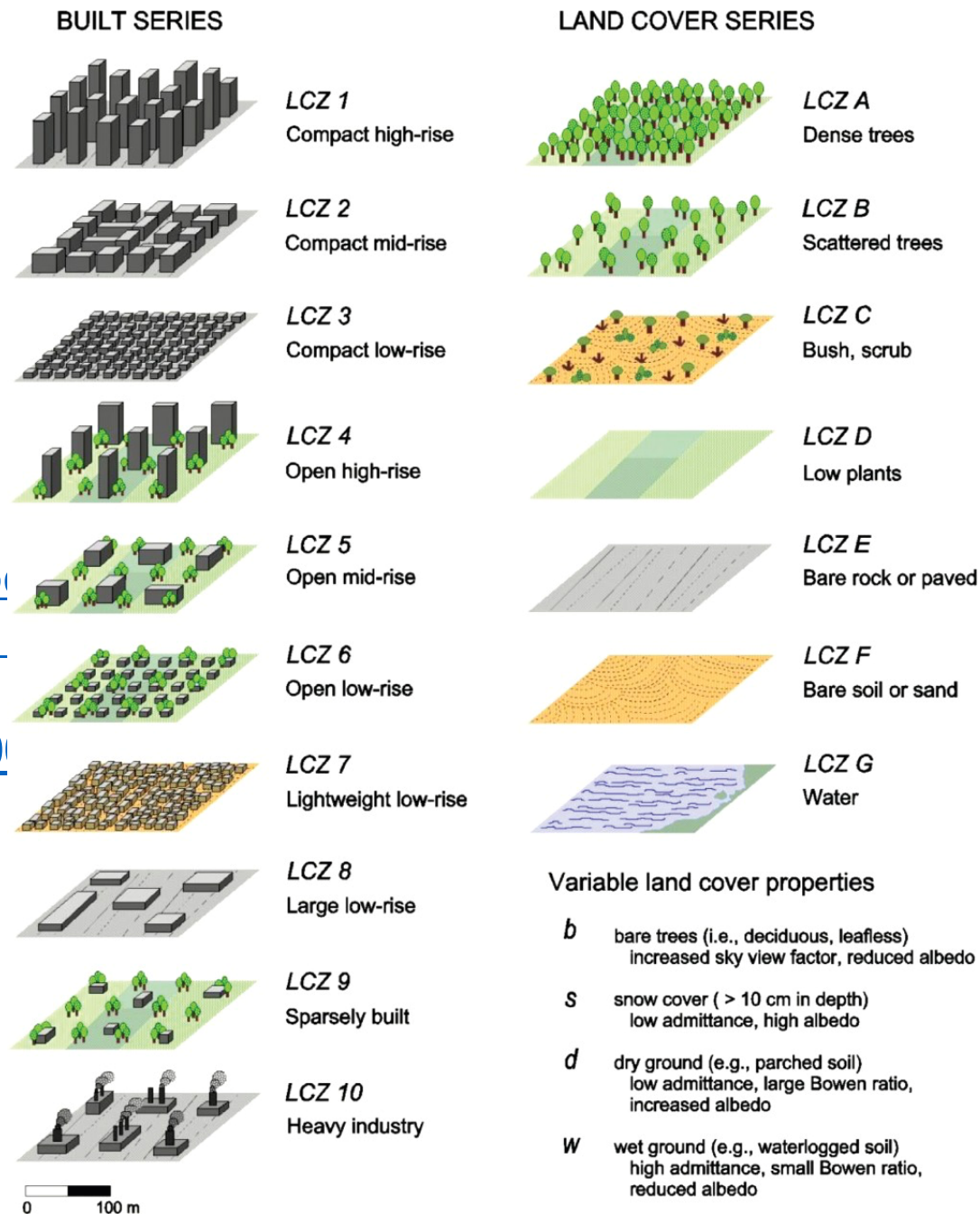
Modello concettuale dell'atmosfera urbana



Caratteristiche urbane orizzontali

- Descrivibile in termini di
**Local Climate Zone
(LCZ)**

Stewart, I.D. and Oke, T.R. 2012. Local Climate Zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93: 1879-1901



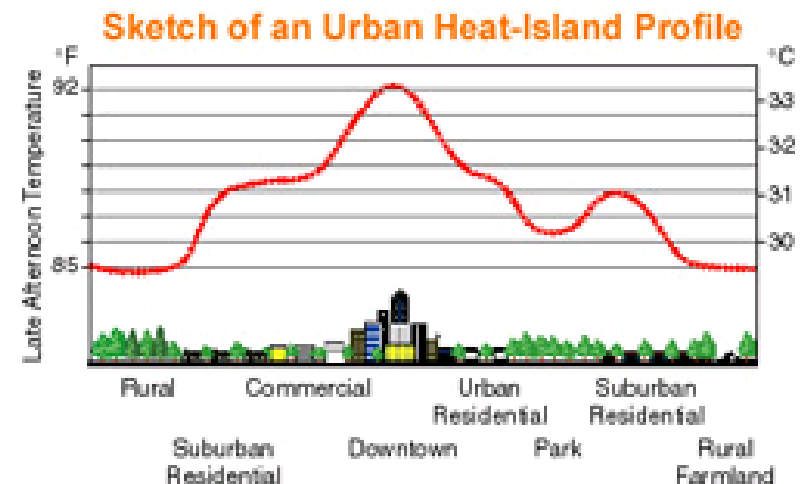
L'isola di calore urbana (UHI)

- E' il principale e più studiato fenomeno dell'atmosfera urbana, già osservato da

Howard nella città di Londra (1810)

- Nel 1937 Albert Kratzer nel volume *"Das Stadtklima"* per la prima volta introdusse il concetto di *"ISOLA DI CALORE"* (*Städtische Wärmeinsel*)
- Urban Heat Island (UHI): T. R. Oke, 1982: The energetic basis of the urban heat island, Quarterly Journal of the RMS, 108 (455), 1-2

Area urbana o metropolitana sensibilmente più calda delle aree rurali circostanti per cause antropogeniche.



Definizione e principali caratteristiche dell'isola di calore urbana

UHI: **isoterme chiuse** che individuano un'area superficiale relativamente più calda, in genere urbanizzata

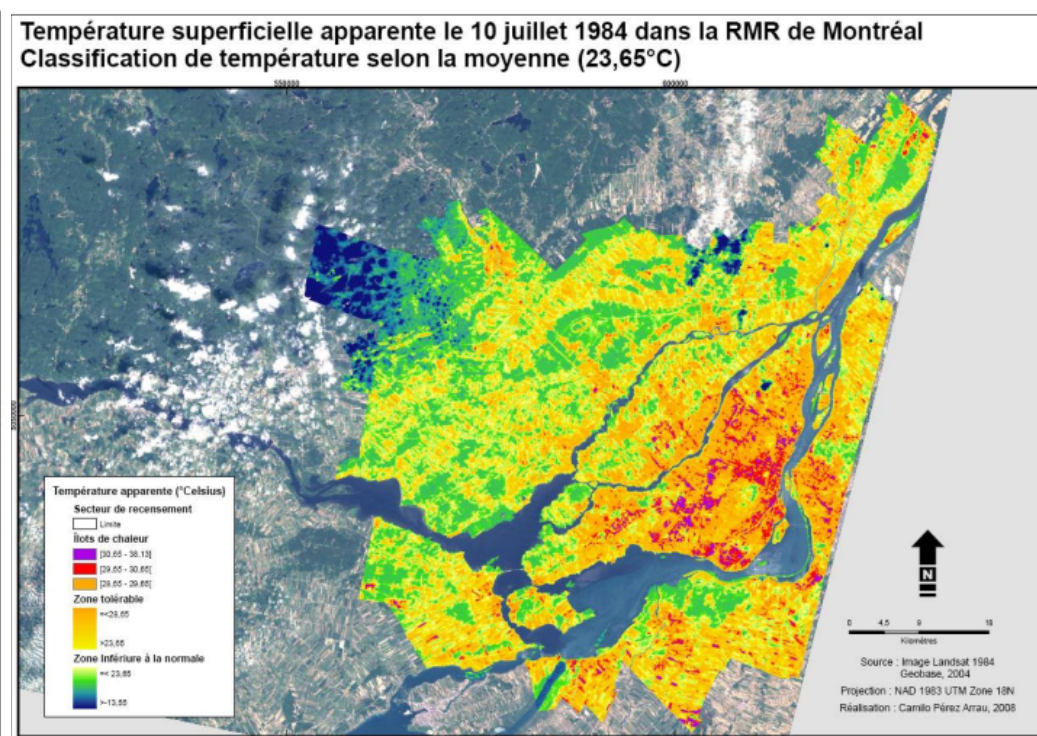
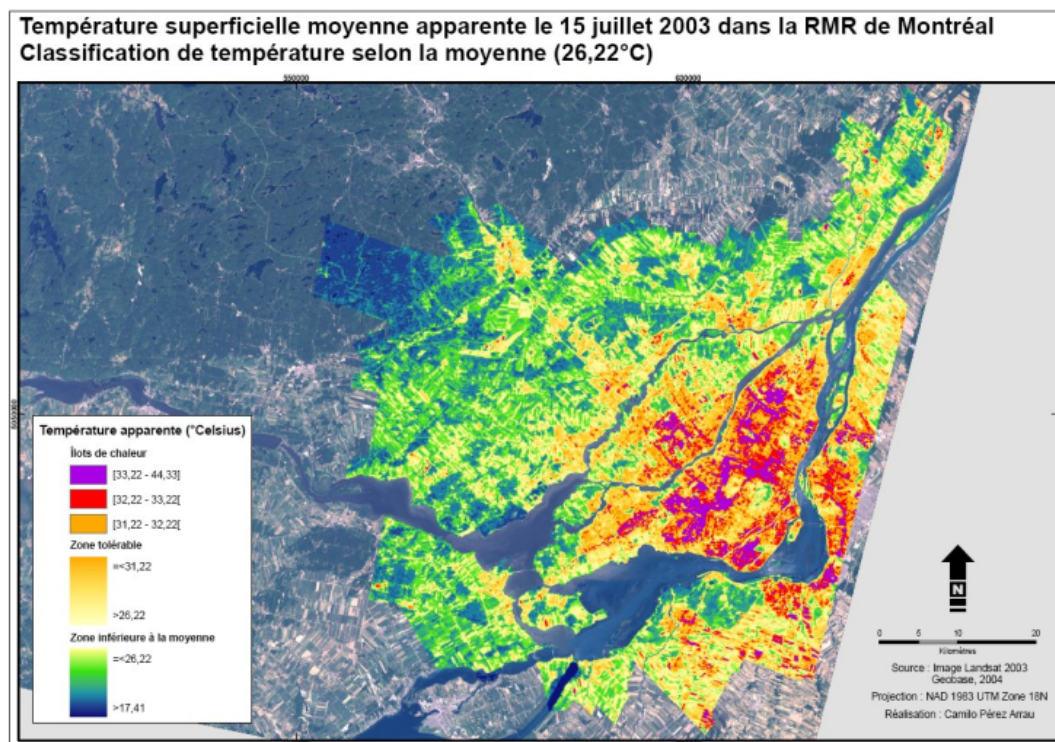
Il termine deriva per analogia tra la configurazione delle isoterme e quella delle curve di livello topografiche di un'isola.

La **temperatura media annua** di una grande città (~ **10^6** abitanti) può essere di **$1^\circ \div 2^\circ\text{C}$** più elevata rispetto all'ambiente rurale circostante, mentre in single notti calme e serene può raggiungere i **12°C** .

Il calore si propaga verticalmente fino a formare una cupola (**heat dome**) in **condizioni di calama**, ed un pennacchio caldo (**urban heat plume**) **sottovento** in condizioni ventilate .

Il fenomeno dell'Isola di Calore (UHI)

- Indice UHI: $I_{UHI} \equiv \Delta T = T_{urb} - T_{rur}$
- **Problema:** definire e misurare correttamente T_{urb} e T_{rur} !



UHI a Montreal: 2003 (a sinistra) e 1984 (a destra)

UHI e LCZ



Heat island magnitudes ($\Delta T_{LCZ X-D}$) for Vancouver during a nighttime traverse in calm, clear weather (2200 hours; 4 November 1999).

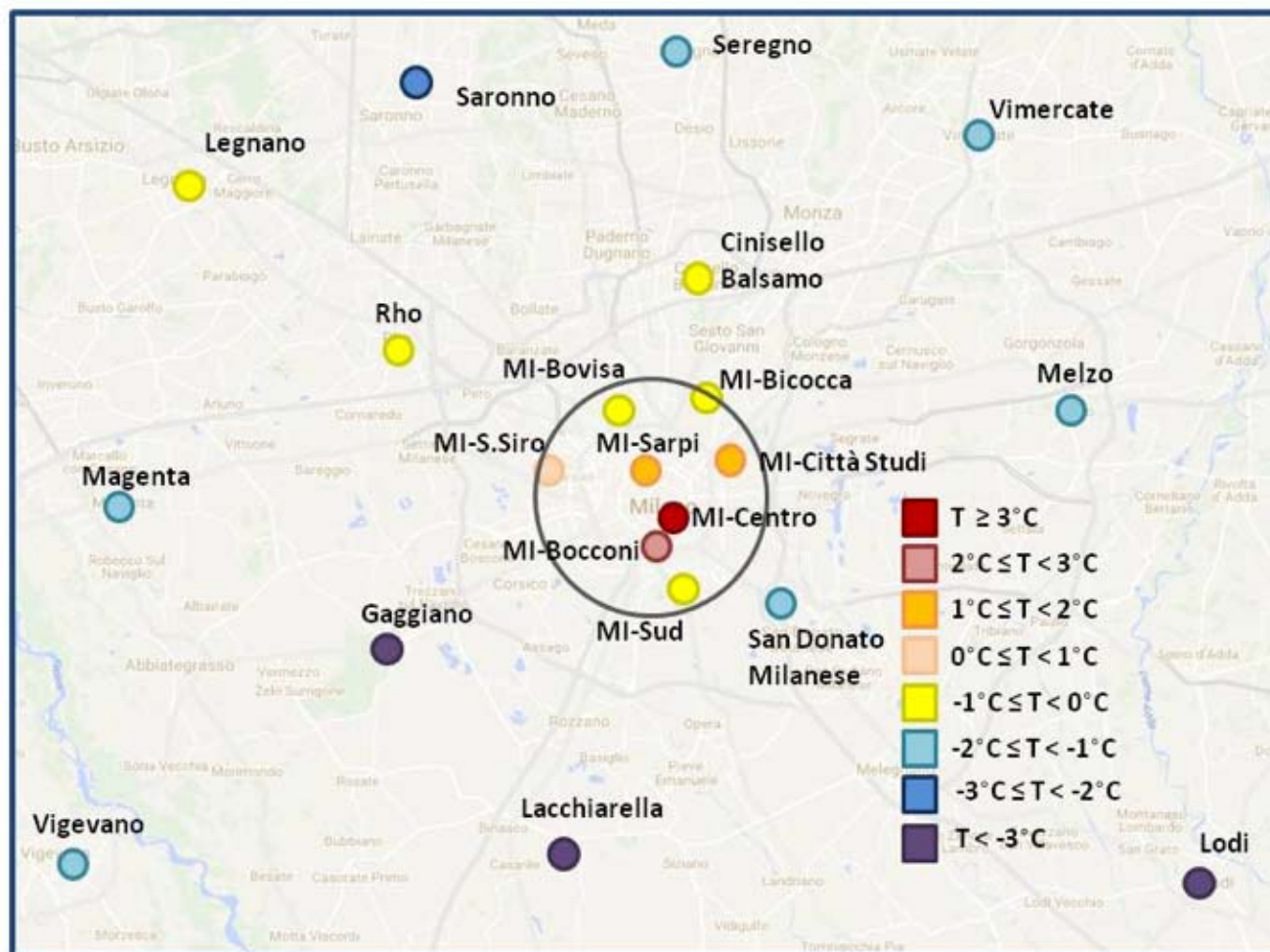
Iain D. Stewart, T. R. Oke, E. Scott Krayenhoff (2013)

Osservazioni dell'Isola di calore a Milano

Stazioni della rete
FOMD CN[®] nell'area
metropolitana di
Milano:

Indice UHI il 1°
Gennaio 2017 alle
ore 05:00 AM

Il fenomeno della
UHI è ben
evidenziato dalla
stazione di Milano
Centro e da quelle
immediatamente
circostanti

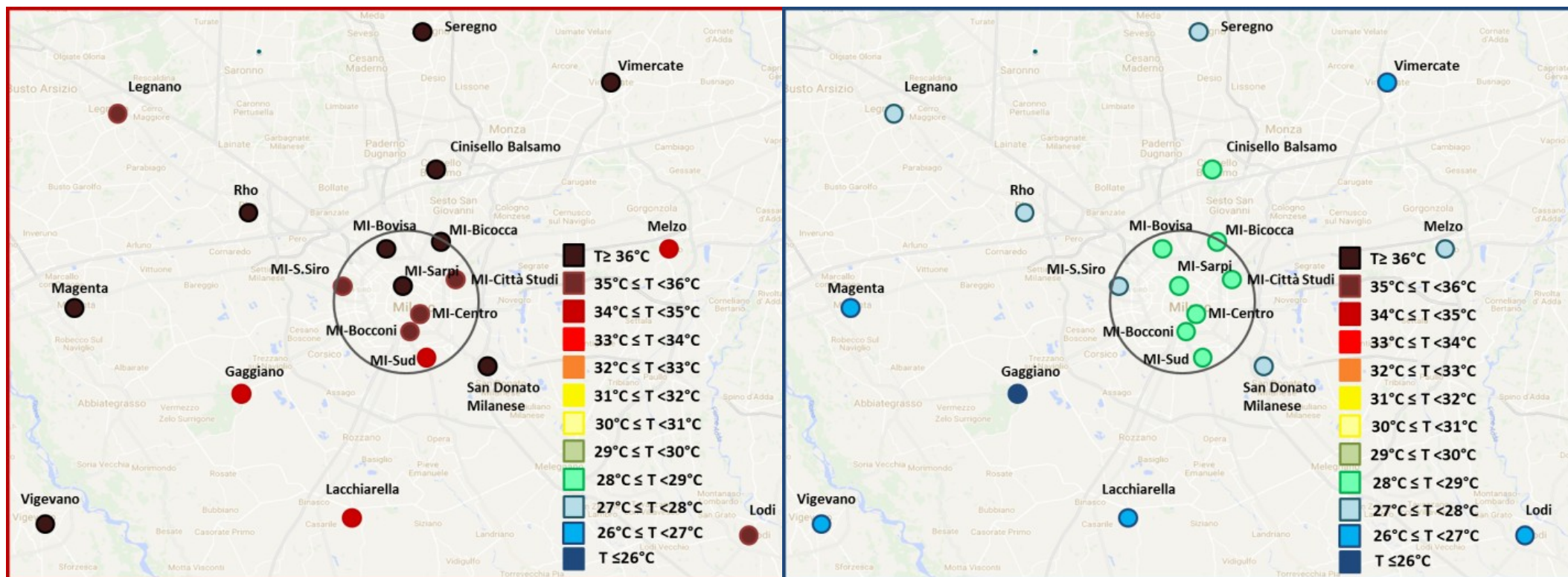


Osservazioni dell'Isola di calore a Milano

Misure di temperatura delle rete urbana Climate Network®

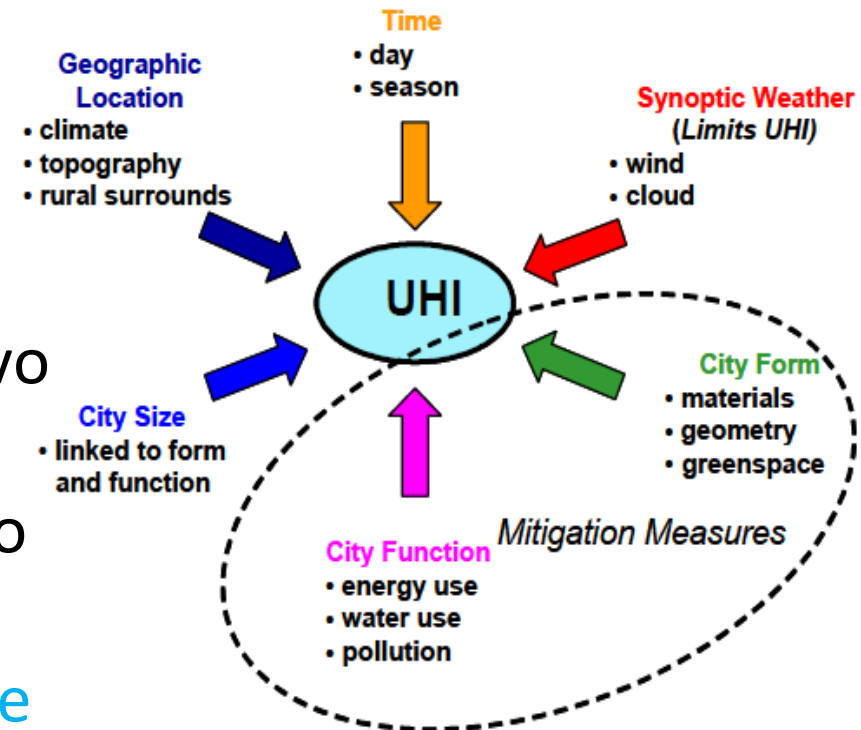
03 August 2017, 17:00-18:00

04 August 2017, 02:00-03:00



Cause dell'Isola di calore urbana

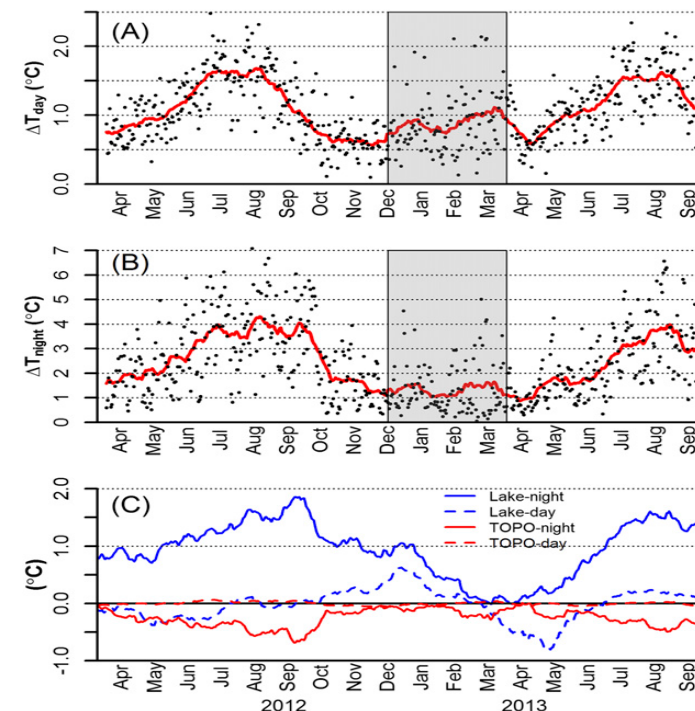
- **Differente raffreddamento** tra tessuto urbano e ambiente rurale
- Superfici esposte alla radiazione solare con maggiore **capacità** e **conduttività** termica, minore **albedo** e maggiore **emissività**
- **Effetti geometrici** che aumentano l'efficienza del riscaldamento radiativo diurno (**Urban Canyon Effect**), riducendo il raffreddamento radiativo notturno, e attenuano il **vento**
- Formazione di uno strato d'**inversione notturna** che limita il rimescolamento turbolento



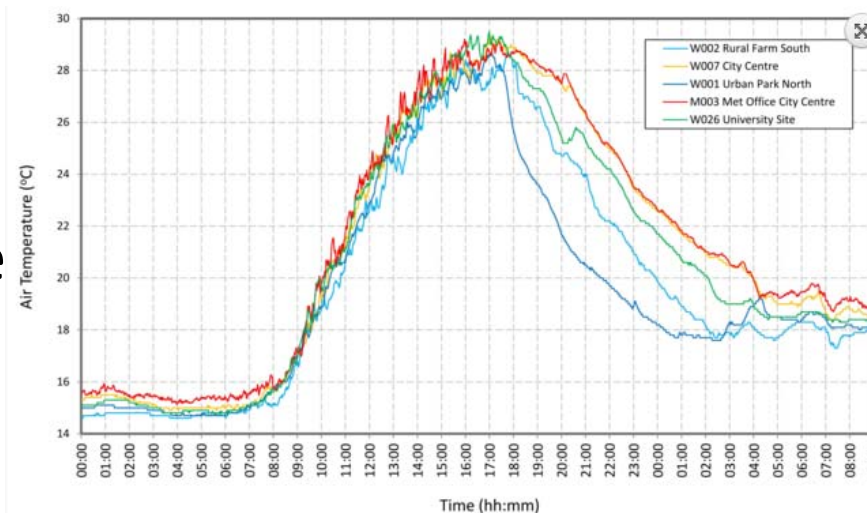
Climatologia dell'Isola di calore urbana

- Estate e in inverno (specialmente con neve), in genere con **scarsa ventilazione** e **ridotta nuvolosità**
- Più intensa durante la **notte**
- Ridotta **umidità ed evapotraspirazione**
- Ridotta **ventilazione**
- Dipende dalla conformazione urbana e dalla localizzazione geografica
- Riduce l'incidenza di nebbie, aumenta l'attività convettiva, induce una debole circolazione ciclonica

Stagionalità della UHI a Madison, Wisconsin)

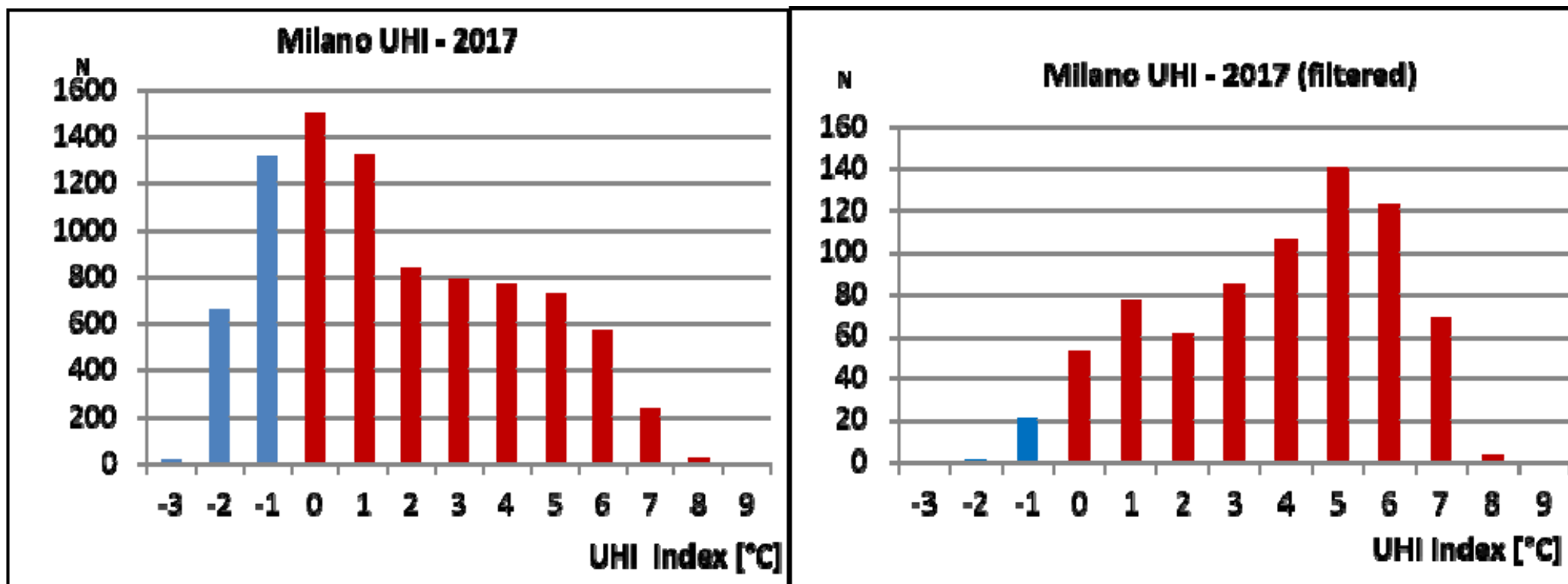


Differenze tra città e campagna nel corso del giorno e della notte a Birmingham



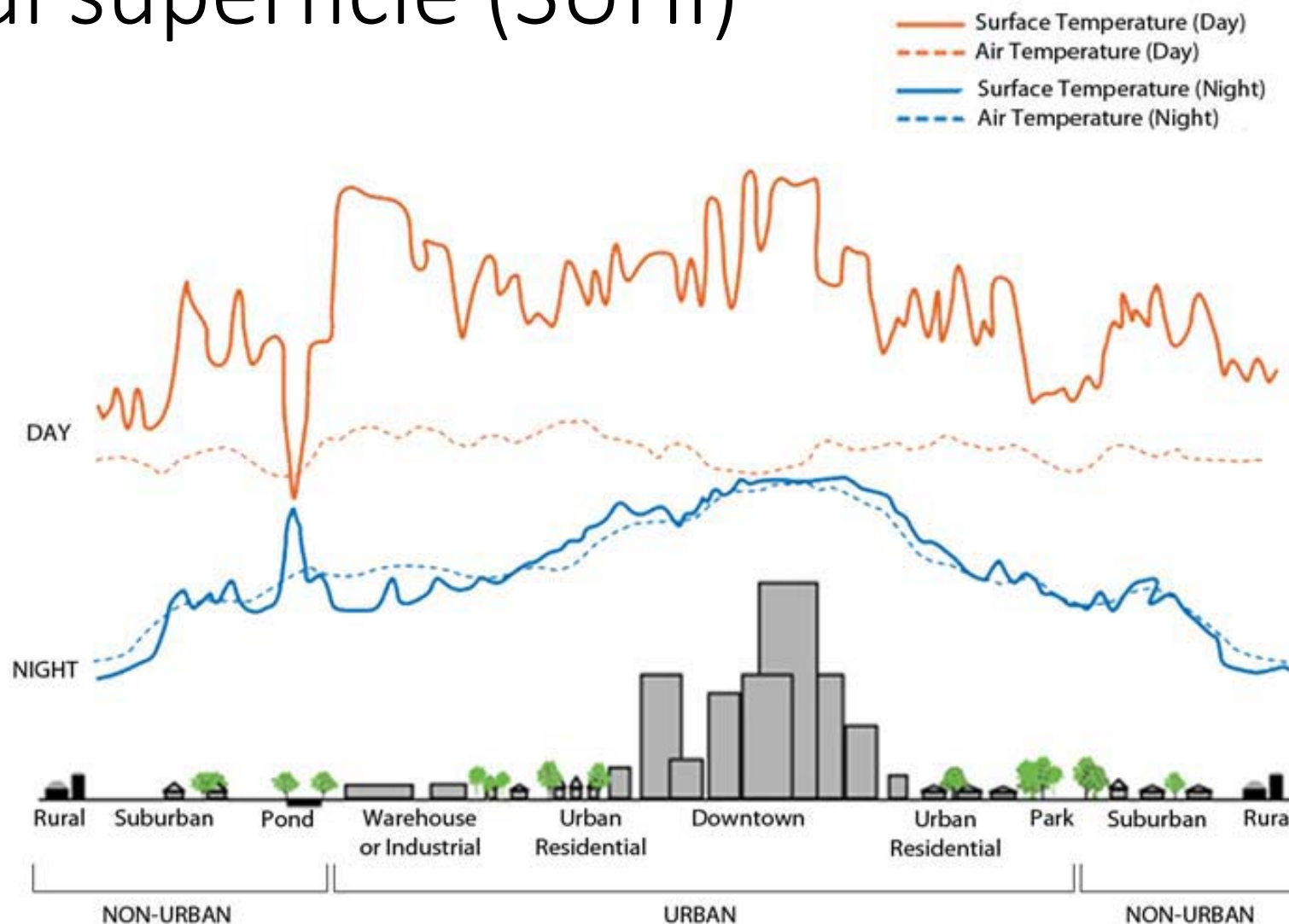
Climatologia dell'UHI a Milano

Statistica dell'indice UHI relativa al 2017 e alla stazione CN[®] di Milano Centro (riferimento extra-urbano: media di 6 stazioni selezionate di reti esterne)



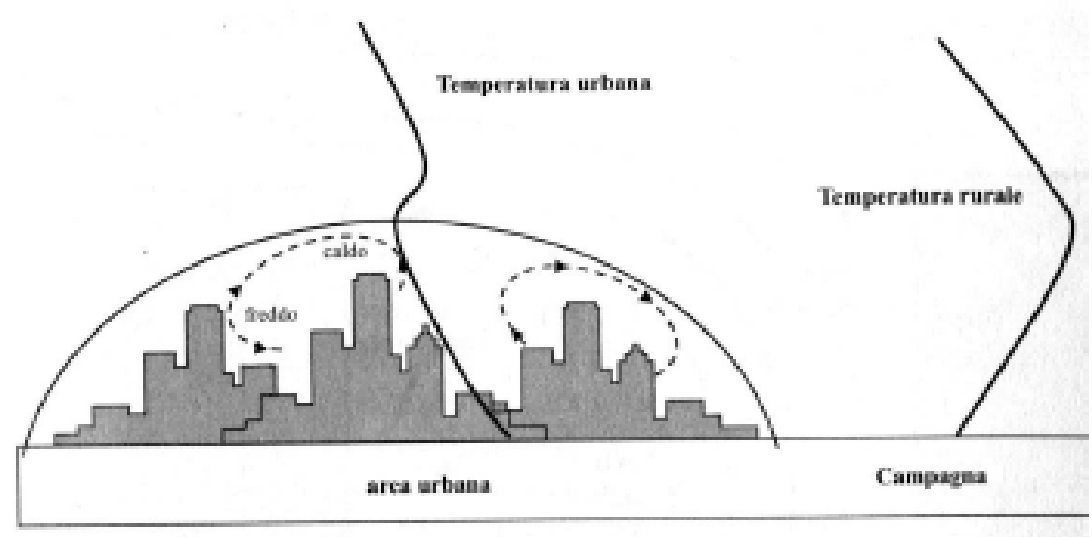
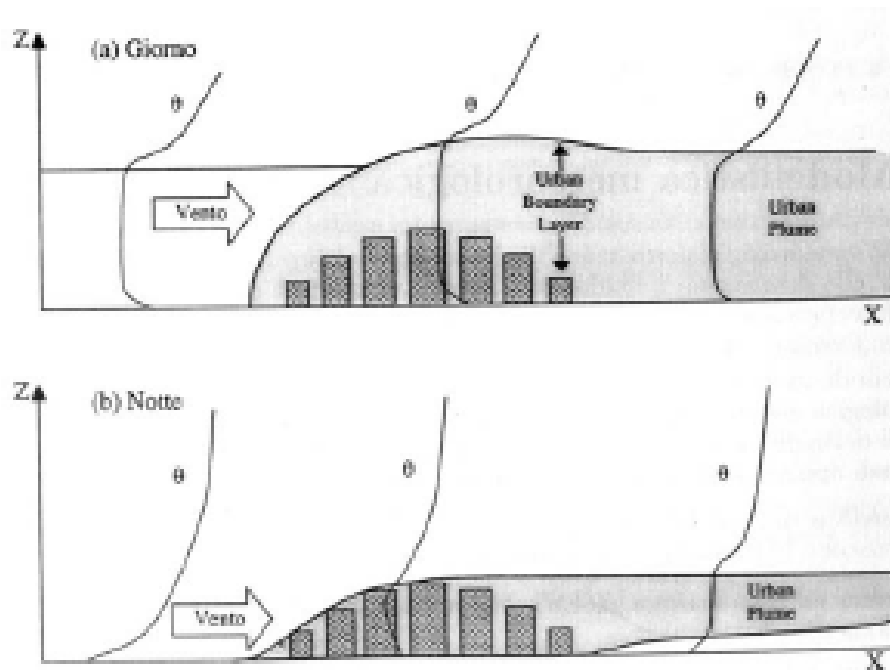
L'isola di calore urbana di superficie (SUHI)

Temperature
epidermiche
diurne e
notturne in
aree con
diverso utilizzo
del suolo
(Voogt, 2000)



alterazione dei profili termici

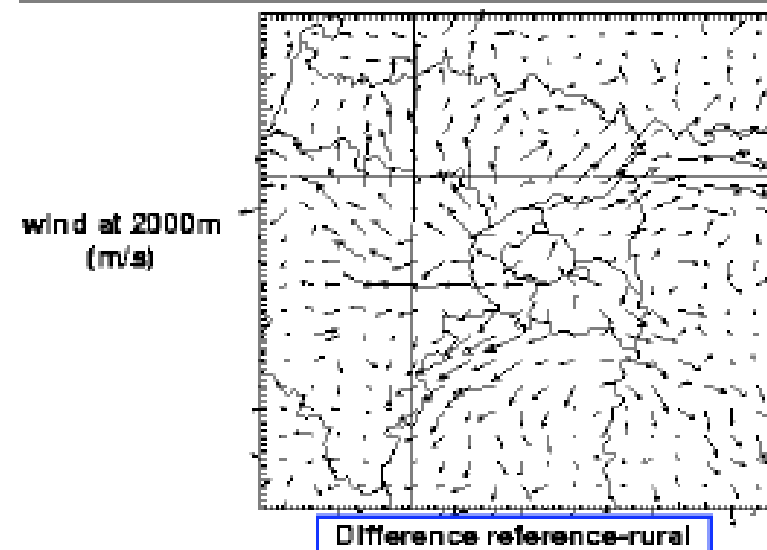
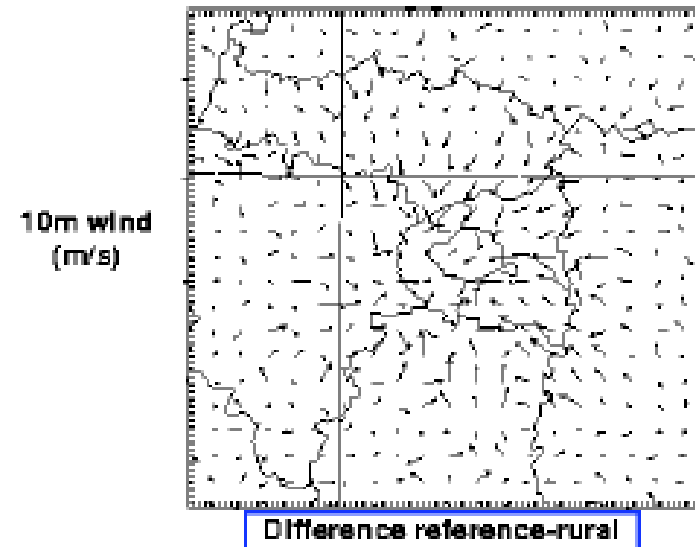
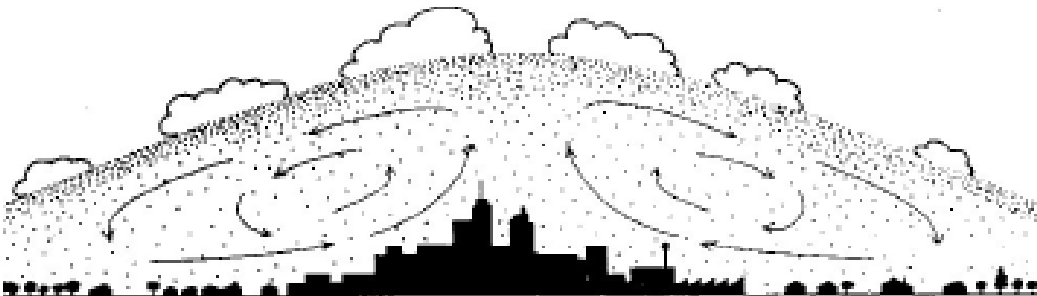
Modifica del profilo verticale di temperatura



Campo del vento orizzontale

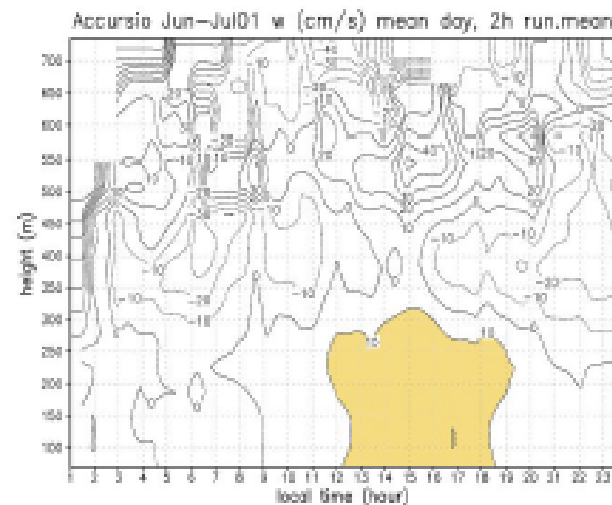
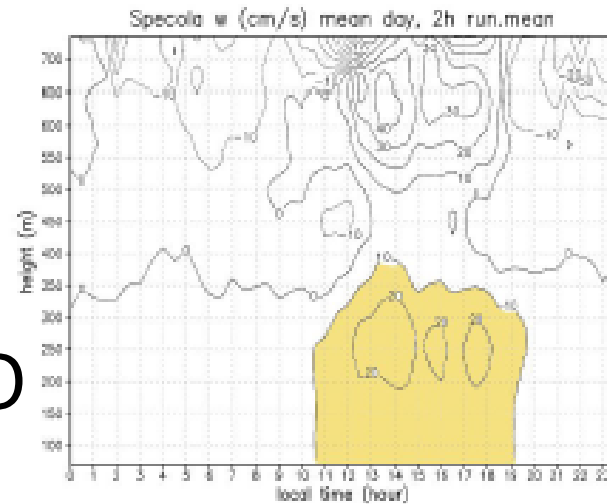
circolazioni indotte

- isola di calore intensifica moti turbolenti convettivi sopra le aree urbane
- mediamente aumenta la velocità verticale
- convergenza nei bassi strati (richiama aria dalla periferia verso il centro)
- divergenza al top del PBL



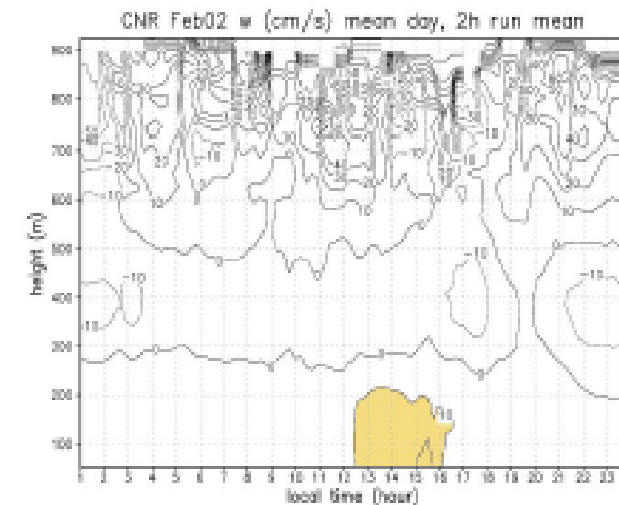
moti convettivi

Campo del vento verticale



misure sodar mostrano:

- intense velocità verticali (10/20 cm/s) in primavera e in estate
- moti convettivi (10 cm/s) anche in inverno nelle ore più calde



Conseguenze della UHI

- Temperatura
 - I profili verticali nei bassi strati vengono modificati alterando le condizioni di stabilità/instabilità
- Vento
 - Variazioni d'intensità (attrito) e variabilità (turbolenza)
 - Circolazioni cicloniche indotte
- Precipitazioni
 - Intensificazione di quelle convettive
 - Diminuzione (?) di quelle non convettive

Condizioni sinottiche e meso-sinottiche

- Fenomenologia a scala sinottica: saccature, promontori, fronti
- La meso-scala: sistemi convettivi
- I tipi di tempo
- Gli effetti sull'UBL e sull'UHI:
 - Venti
 - Precipitazioni
 - Radiazione
 - Inversioni

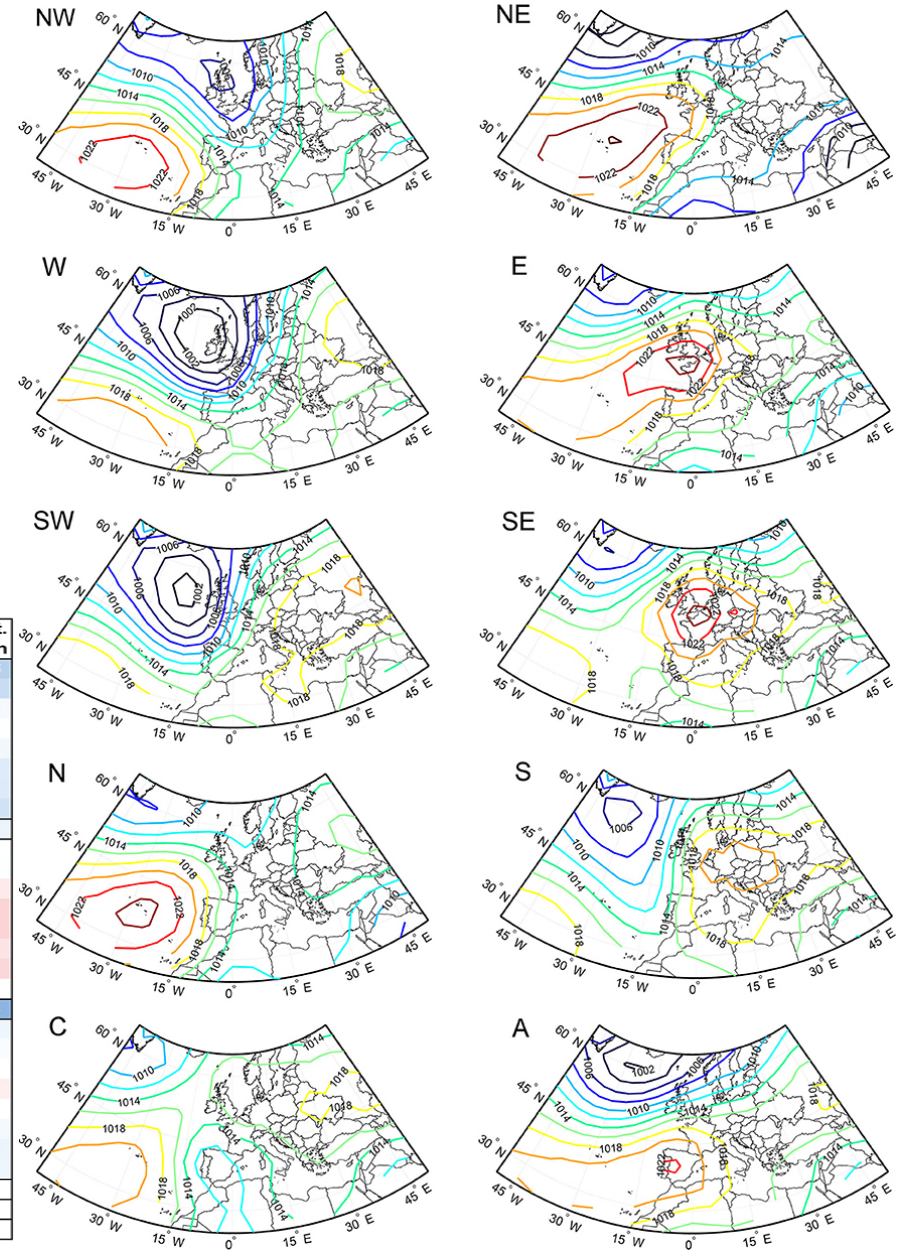
I tipi di tempo

Classificazione delle circolazioni in quota:

- Configurazioni (ciclonica, anticiclonica)
- Origine e provenienza delle Masse d'aria
- Avvezioni
- Sviluppo verticale

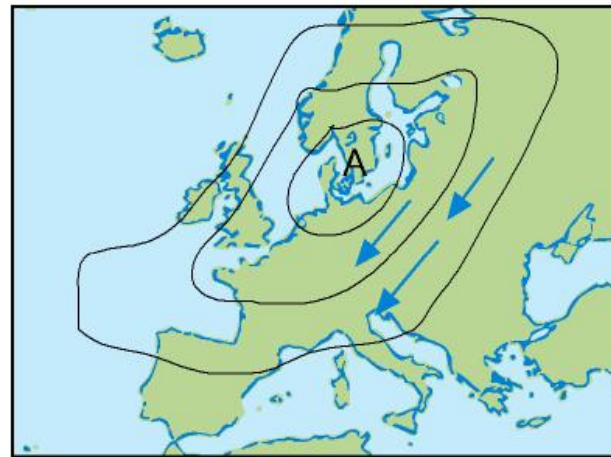
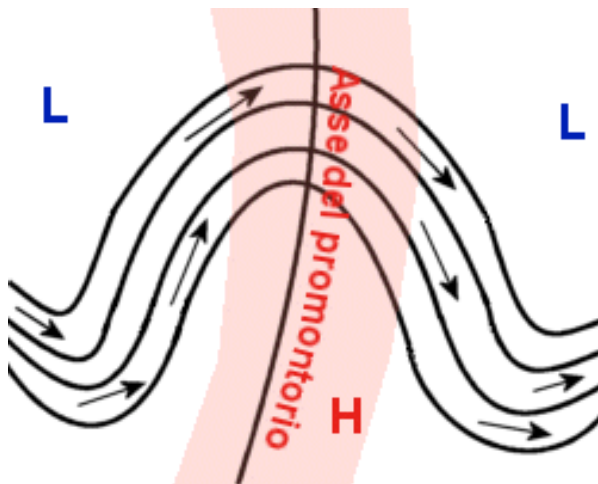
	Weather Types (WTs)	Short form	Winter			Spring			Summer			Autumn			Mont. Mean
			Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	
Directional WTs	Northeasterly	NE	4.4	5.0	5.5	5.3	12.0	14.5	21.8	28.6	26.3	10.9	7.3	6.1	12.3
	Easterly	E	4.4	4.4	7.6	9.4	8.4	8.9	13.1	15.9	13.6	13.1	9.4	6.0	9.5
	Southeasterly	SE	4.2	3.6	3.5	5.1	3.3	2.3	1.0	0.6	1.0	2.8	4.2	3.2	2.9
	Southerly	S	1.9	2.7	2.6	2.0	0.8	0.9	0.1	0.0	0.1	0.7	2.8	2.2	1.4
	Southwesterly	SW	6.2	5.7	6.6	4.9	2.7	2.3	0.4	0.1	0.1	1.7	5.3	5.2	3.4
	Westerly	W	8.7	10.0	9.2	7.7	7.0	5.9	1.6	0.3	1.0	4.6	7.9	9.0	6.1
	Northwesterly	NW	6.9	6.8	6.9	6.0	7.4	8.7	6.3	3.7	4.7	6.0	5.1	7.3	6.3
	Northerly	N	5.3	3.6	4.1	6.0	9.1	9.8	11.9	14.8	14.8	7.4	4.8	5.2	8.1
Cyclonic WTs	Pure cyclonic	C	5.4	4.7	4.3	5.3	9.0	5.4	2.7	1.6	1.6	2.4	3.9	5.1	4.3
	Cyclonic Northeasterly	CNE	1.0	0.2	0.7	1.2	2.5	2.0	2.4	3.0	1.3	1.4	0.8	0.8	1.4
	Cyclonic Easterly	CE	1.0	0.8	0.7	1.2	3.1	2.3	2.2	1.4	1.3	2.2	2.0	1.0	1.6
	Cyclonic Southeasterly	CSE	1.0	0.5	0.5	0.8	0.9	0.7	0.2	0.2	0.2	0.6	0.7	0.9	0.6
	Cyclonic Southerly	CS	0.9	0.4	0.6	0.7	0.4	0.4	0.1	0.0	0.1	0.3	0.5	1.6	0.5
	Cyclonic Southwesterly	CSW	0.7	0.5	0.6	0.7	0.9	0.5	0.1	0.0	0.0	0.3	0.7	1.0	0.5
	Cyclonic Westerly	CW	0.8	0.9	1.2	0.4	0.6	0.9	0.2	0.1	0.2	0.3	0.9	0.4	0.6
	Cyclonic Northwesterly	CNW	0.7	0.5	0.7	0.4	0.9	0.5	0.6	0.2	0.1	0.4	0.5	0.7	0.5
Anticyclonic WTs	Pure anticyclonic	A	23.8	27.2	23.1	20.7	13.3	17.6	14.3	9.6	14.2	23.0	22.3	23.6	19.4
	Anticyclonic Northeasterly	ANE	2.4	1.6	2.0	2.3	2.8	3.0	6.5	7.5	6.8	4.3	2.6	2.0	3.7
	Anticyclonic Easterly	AE	2.0	1.9	1.8	2.5	1.0	1.9	2.2	2.0	1.4	2.8	3.1	2.3	2.1
	Anticyclonic Southeasterly	ASE	1.6	1.4	1.6	1.6	0.6	0.5	0.4	0.1	0.1	1.2	1.5	1.4	1.0
	Anticyclonic Southerly	AS	0.8	1.0	1.0	0.8	0.4	0.1	0.2	0.1	0.1	0.6	1.5	0.7	0.6
	Anticyclonic Southwesterly	ASW	2.0	2.0	2.0	2.0	0.7	0.6	0.2	0.0	0.0	0.5	1.9	1.5	1.1
	Anticyclonic Westerly	AW	5.2	6.8	5.3	4.5	2.5	2.2	0.5	0.1	0.6	2.4	3.3	4.3	3.1
	Anticyclonic Northwesterly	ANW	5.1	5.1	4.7	4.7	4.0	3.8	4.4	2.7	3.5	5.1	3.6	4.6	4.3
	Anticyclonic Northerly	AN	3.2	2.5	2.6	3.4	4.6	3.5	5.4	6.3	6.0	4.5	2.9	3.1	4.0
	Sum of directional WTs		42.0	41.8	46.0	46.4	50.7	53.3	56.2	64.0	61.6	47.2	46.8	44.2	50.0
Sum of cyclonic WTs			11.9	8.7	10.0	11.2	19.5	13.7	9.7	7.6	5.8	8.3	10.2	12.2	10.7
Sum of anticyclonic WTs			46.1	49.5	44.1	42.5	29.9	33.2	34.1	28.4	32.7	44.4	42.7	43.5	39.3

Last column shows the mean of the 12 monthly values for each WT. Color scale helps visualize inter monthly variability. Scale number at right (28.6) refers to the highest frequency of all 26 WTs, while scale midpoint (white color) is equal to the first quartile (0.7). A similar red/blue scale is applied to the last three rows, but with different quartile and maximum values (not showed).

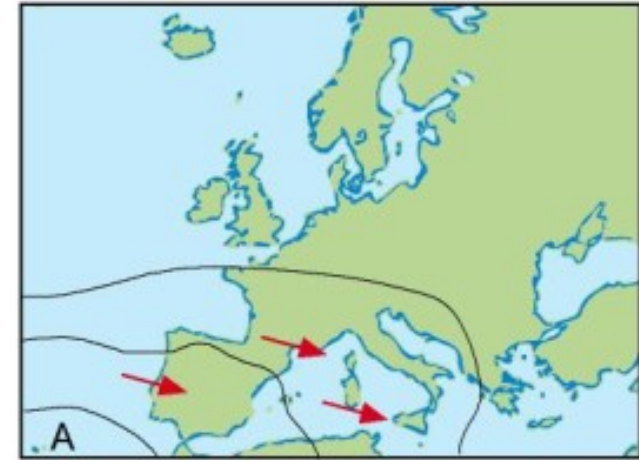


Anticlon i

- Stabilità
- Persistenza
- Inversioni



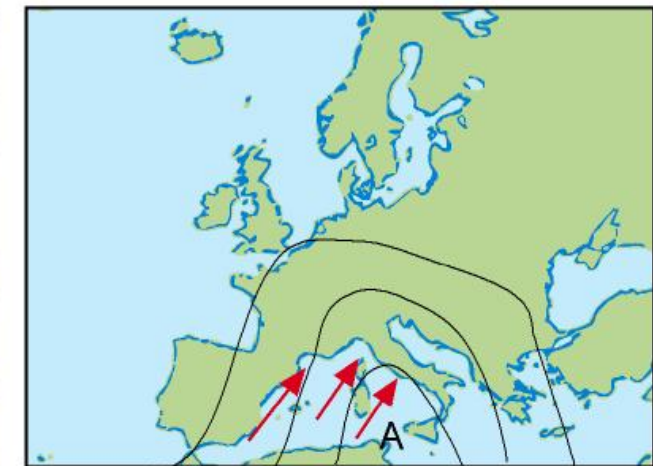
L'anticiclone Scandinavo



L'anticiclone delle Azzorre



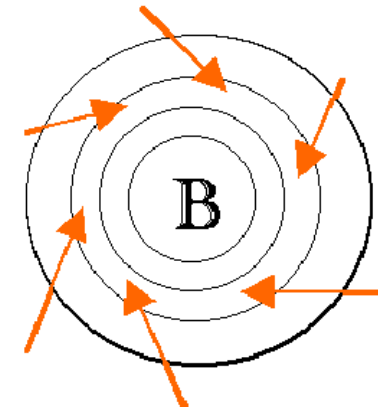
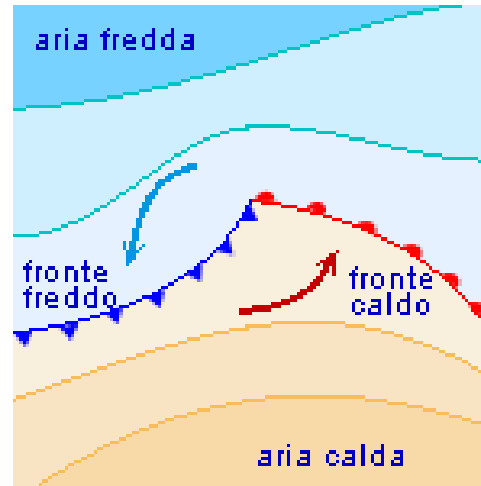
L'anticiclone Russo Siberiano



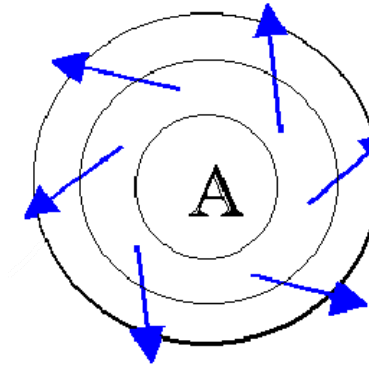
L'anticiclone Africano

Cicloni e saccature (perturbazioni e fronti)

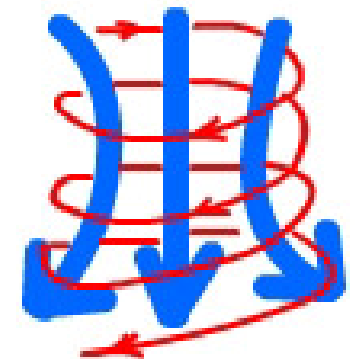
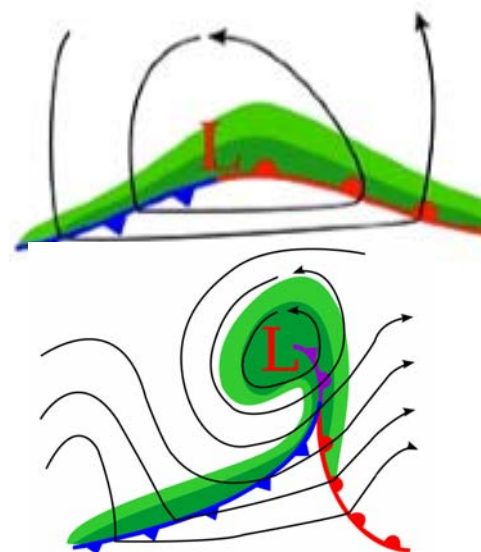
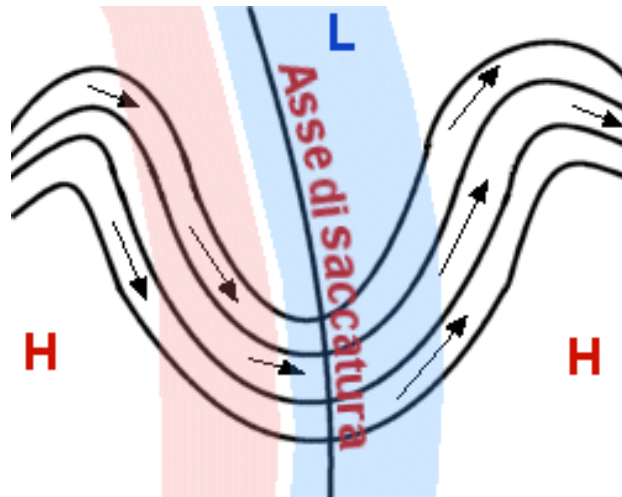
- Instabilità (!)
- Venti
- Nuvolosità
- Precipitazioni



Ciclone



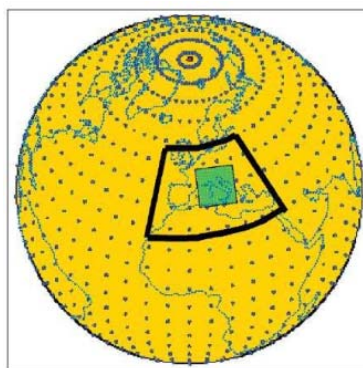
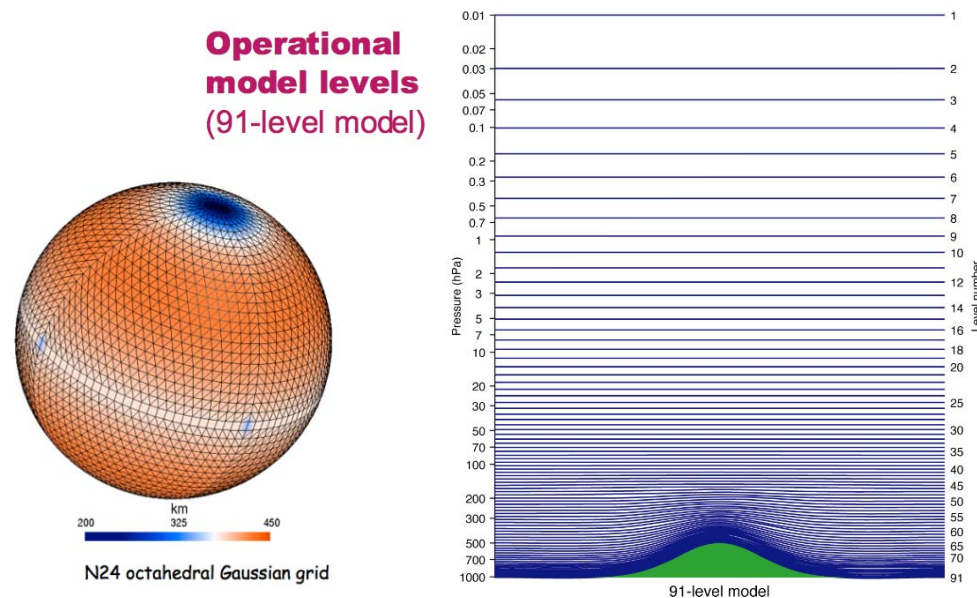
Anti-ciclone



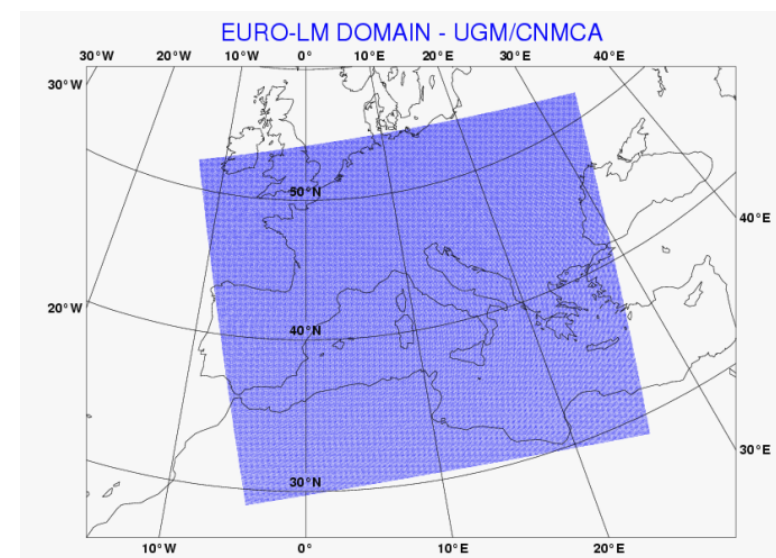
Modelli dell'atmosfera

**globali e accoppiati
(atmosfera più terra e oceani)**

- ad area limitata (non idrostatici)



- ad alta risoluzione (< 1km: aree montane, urbane,...)



I modelli per la previsione del tempo (1)

- La Fisica:

- Sistema di equazioni alle derivate parziali

- Equazioni diagnostiche
- ... e prognostiche (t)

- Semplificazioni

- Approssimazioni

- Parametrizzazioni

- Velocità orizzontale del vento

$$\frac{\partial u}{\partial t} = - \left\{ \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial E_h}{\partial \lambda} - v V_a \right\} - \zeta \frac{\partial u}{\partial \zeta} - \frac{1}{\rho a \cos \varphi} \left(\frac{\partial p'}{\partial \lambda} - \frac{1}{\sqrt{\gamma}} \frac{\partial p_0}{\partial \lambda} \frac{\partial p'}{\partial \zeta} \right) + M_u$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = - \left\{ \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial E_h}{\partial \varphi} - V_a \right\} - \zeta \frac{\partial v}{\partial \zeta} - \frac{1}{\rho a} \left(\frac{\partial p'}{\partial \varphi} - \frac{1}{\sqrt{\gamma}} \frac{\partial p_0}{\partial \varphi} \frac{\partial p'}{\partial \zeta} \right) + M_v$$

- Velocità verticale

$$\frac{\partial w}{\partial t} = - \left\{ \frac{1}{a \cos \varphi} \left(u \frac{\partial w}{\partial \lambda} + v \cos \varphi \frac{\partial w}{\partial \varphi} \right) \right\} - \zeta \frac{\partial w}{\partial \zeta} + \frac{g}{\sqrt{\gamma}} \frac{\rho_0}{\rho} \frac{\partial p'}{\partial \zeta} + \frac{g}{\sqrt{\gamma}} \frac{\rho_0}{\rho} \left\{ \frac{(T - T_0)}{T} - \frac{T_0 p'}{T p_0} + \left(\frac{R_v}{R_d} - 1 \right) q^v - q^l - q^f \right\}$$

- Perturbazione della pressione

$$\frac{\partial p'}{\partial t} = - \left\{ \frac{1}{a \cos \varphi} \left(u \frac{\partial p'}{\partial \lambda} + v \cos \varphi \frac{\partial p'}{\partial \varphi} \right) \right\} - \zeta \frac{\partial p'}{\partial \zeta} + g \rho_0 w - \left(\frac{c_{pd}}{c_v d} \right) p \nabla \cdot \vec{v}$$

- Temperatura

$$\frac{\partial T}{\partial t} = - \left\{ \frac{1}{a \cos \varphi} \left(u \frac{\partial T}{\partial \lambda} + v \cos \varphi \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) \right\} - \zeta \frac{\partial T}{\partial \zeta} - \frac{1}{\rho c_{vd}} p \nabla \cdot \vec{v} + Q_t$$

- Vapore acqueo

$$\frac{\partial q^v}{\partial t} = - \left\{ \frac{1}{a \cos \varphi} \left(u \frac{\partial q^v}{\partial \lambda} + v \cos \varphi \frac{\partial q^v}{\partial \varphi} \right) \right\} - \zeta \frac{\partial q^v}{\partial \zeta} - (S^l + S^f) + M_{q^v}$$

- Acqua allo stato solido e liquido

$$\frac{\partial q^{l,f}}{\partial t} = - \left\{ \frac{1}{a \cos \varphi} \left(u \frac{\partial q^{l,f}}{\partial \lambda} + v \cos \varphi \frac{\partial q^{l,f}}{\partial \varphi} \right) \right\} - \zeta \frac{\partial q^{l,f}}{\partial \zeta} - \frac{g}{\sqrt{\lambda}} \frac{\rho_0}{\rho} \frac{\partial p_{l,f}}{\partial \zeta} + S^{l,f} + M_{q^{l,f}}$$

- Densità totale dell'aria

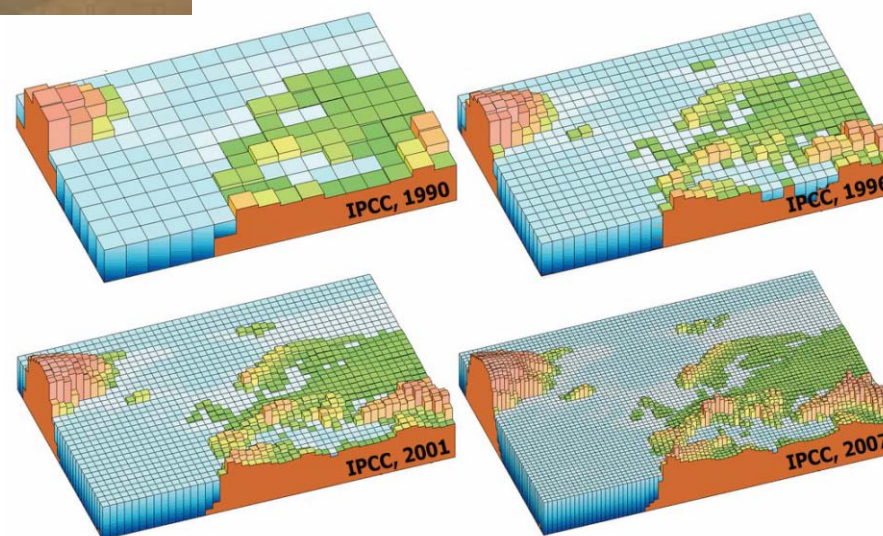
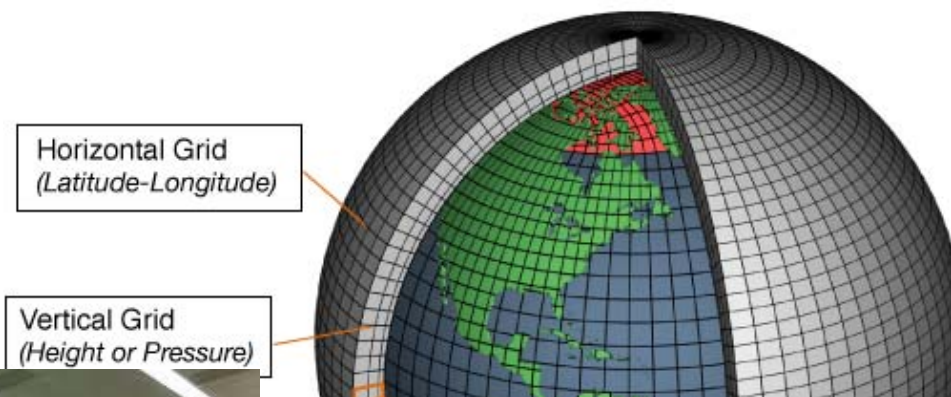
$$\rho = p \left\{ R_d \left(1 + \left(\frac{R_v}{R_d} - 1 \right) q^v - q^l - q^f \right) T^{-1} \right\}$$

$$\text{ove } \sqrt{\gamma} \equiv \frac{\partial p_0}{\partial \zeta}, \quad E_h = \frac{1}{2} (u^2 + v^2) \text{ e } V_a = \frac{1}{a \cos \varphi} \left\{ \frac{\partial v}{\partial \lambda} - \frac{\partial}{\partial \varphi} (u \cos \varphi) \right\} + f.$$

I modelli per la previsione del tempo (2)

La matematica:

- Discretizzazione
- Integrazione numerica
- Algoritmi efficienti e stabili
- Propagazione degli errori
- Supercalcolo mass. parallelo



Modelli operativi

Evoluzione dei modelli meteorologici:

aumento della risoluzione

.... e miglioramento della fisica

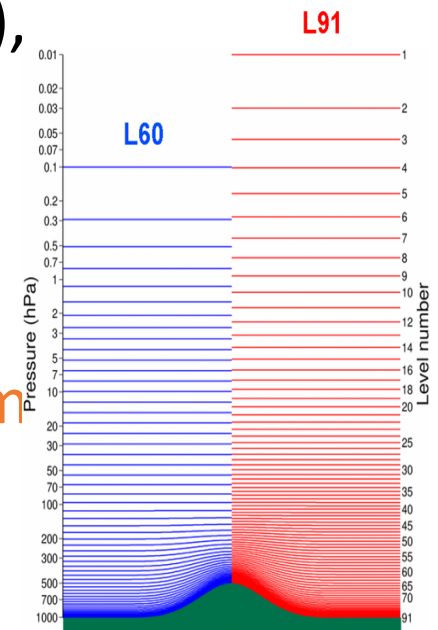
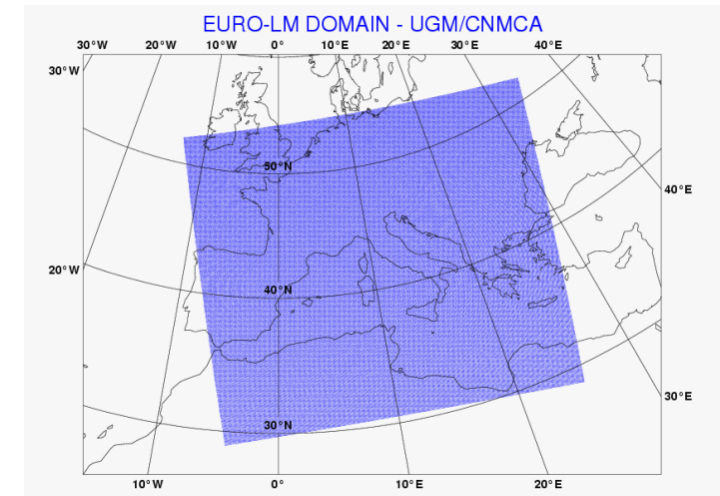
Globali idrostatici: da 50 - 60 fino a ≈ 10 km

ECMWF IFS dal 2016 con risoluzione TCO1279 (spettrale), equivalente a ~ 9 km e con **137 livelli** verticali, 2 x Cray XC40 da 330 Teraflops (ciascuno 192 nodi e ≈ 7000 processori)

Ad area limitata non idrostatici: da 5 - 7 fino a **1 - 3 km**

EuroLM-COSMO (Consorzio europeo)

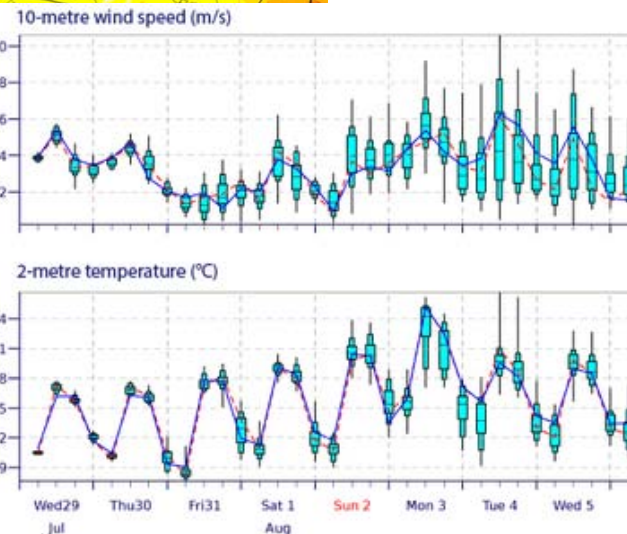
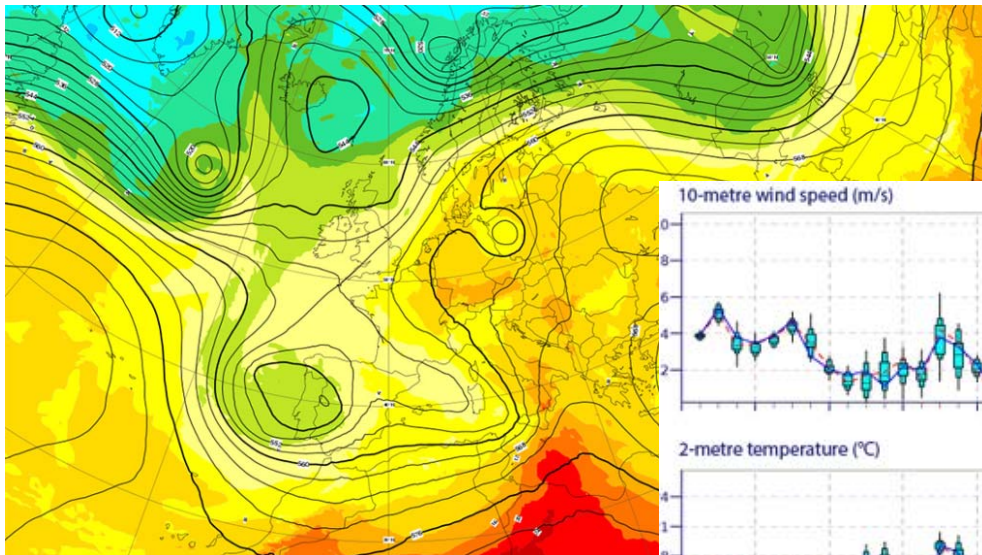
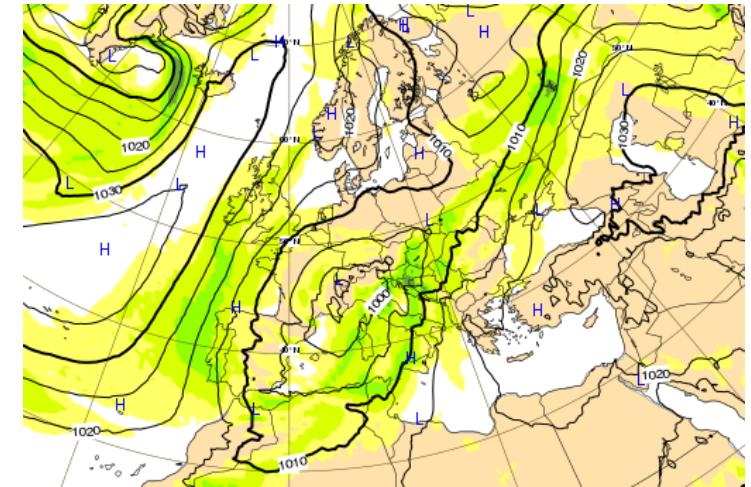
Moloch (CNR-ISAC)



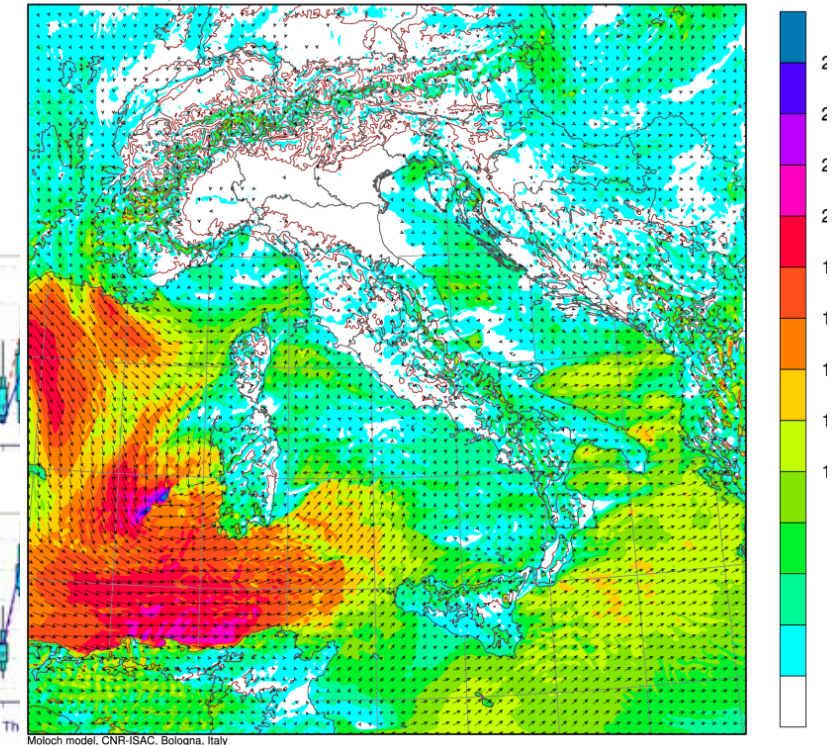
Prodotti di previsione

Model output: spettrale o per griglie
(dati numerici)

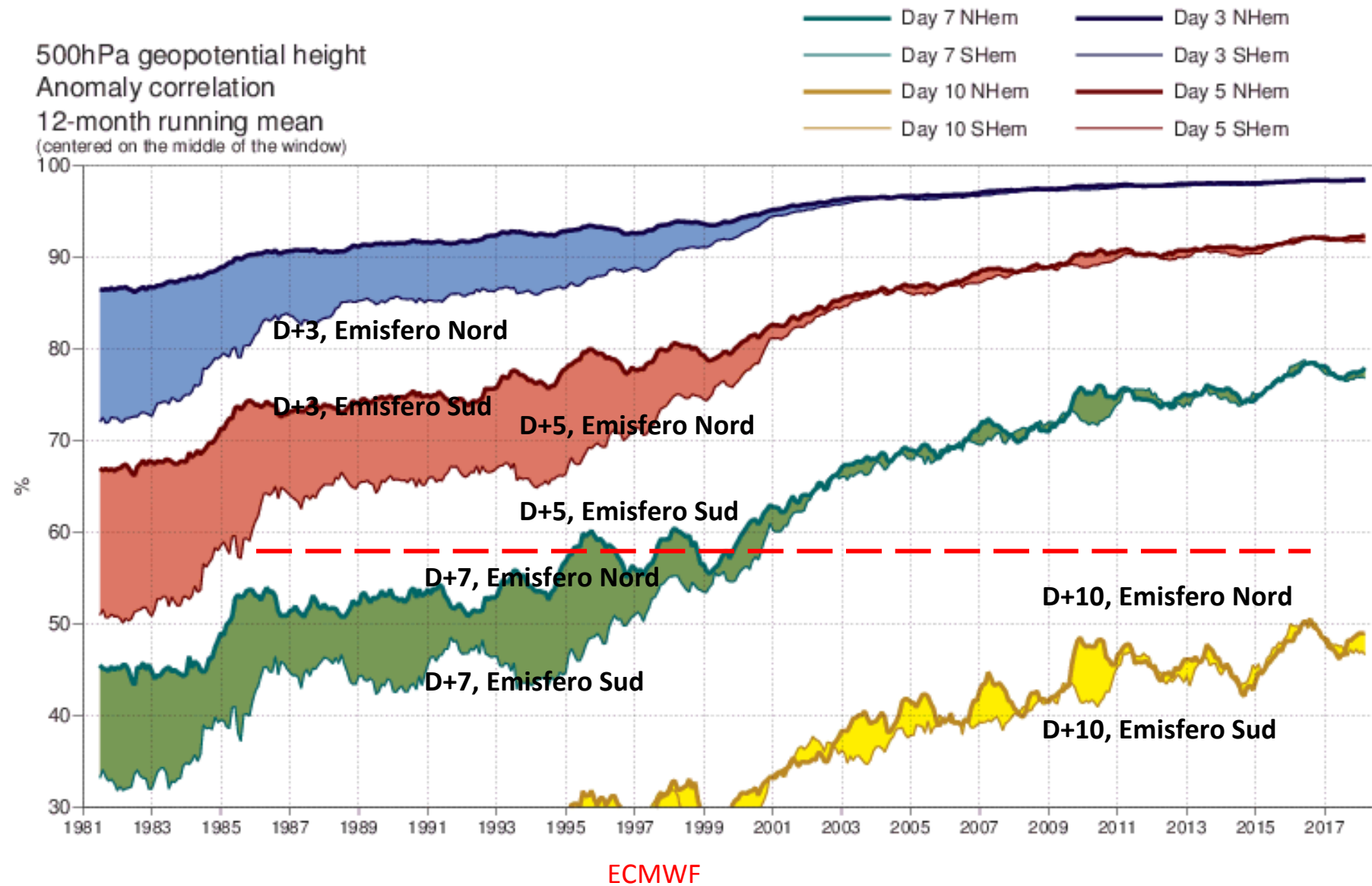
Post-elaborazione:
rappresentazioni grafiche
grandezze derivate
probabilità (ensemble)



Wind at 10 m (m/s)
Initial time Mon, 26/11/2018 03:00 UTC
Forecast +13 h valid Mon, 26/11/2018 16:00 UTC
Orography contoured every 1000 m starting at 500 m

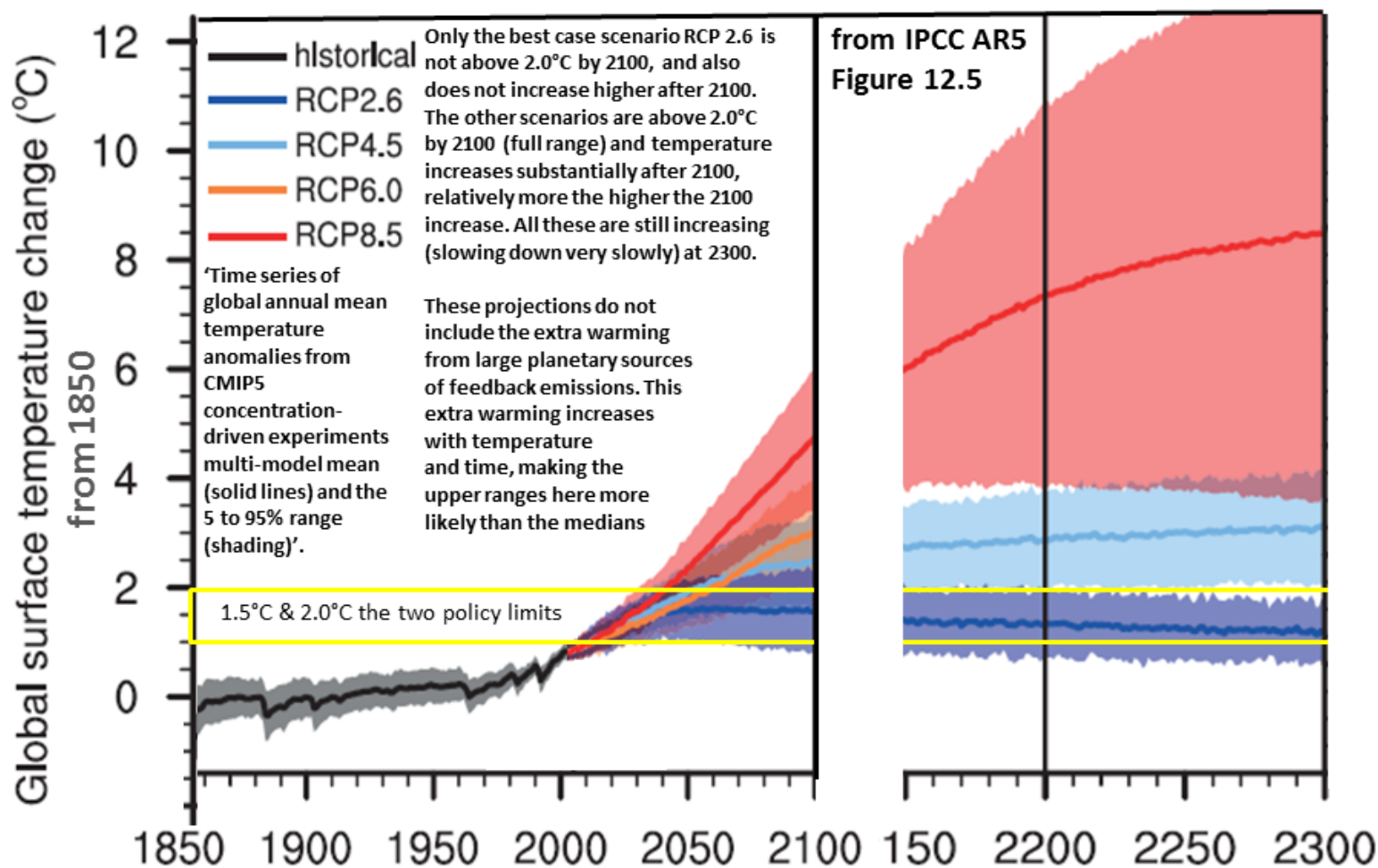


Verifica e limiti dei modelli



Scenari climatici IPCC (da modelli)

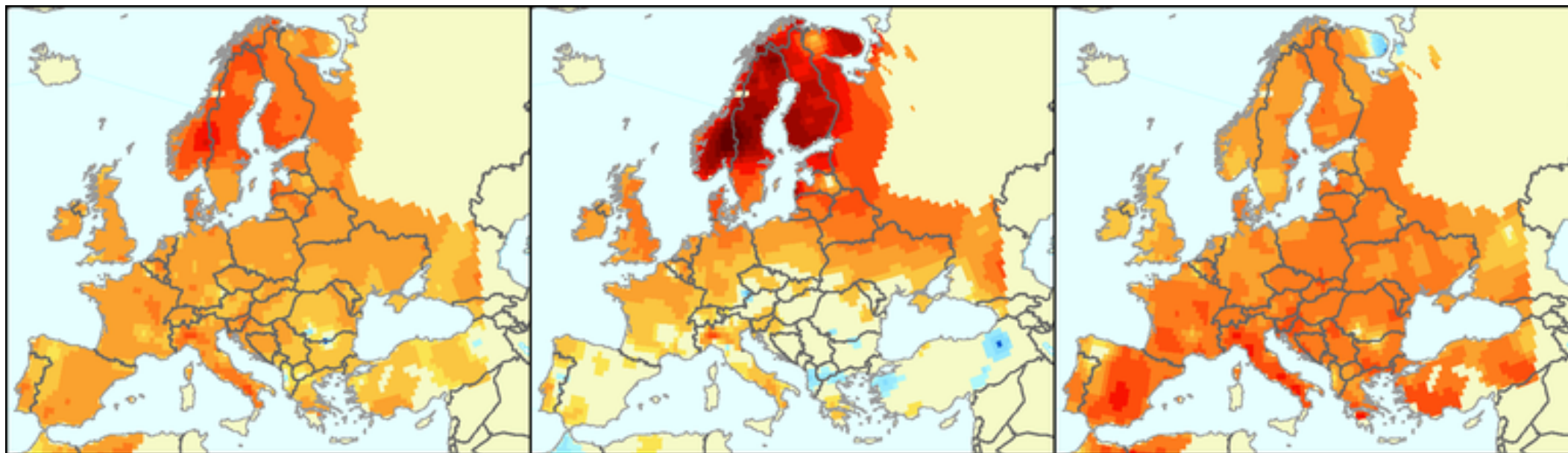
IPCC AR5 temperature increases 1850-2300



IPCC 2014 AR5 global temperature increase projections to 2300 (from 1850)

Peter Carter

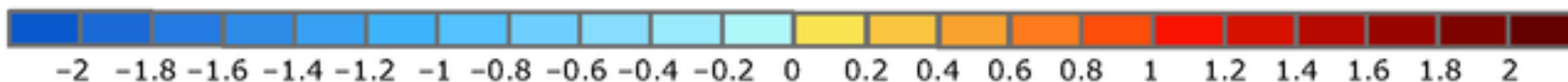
Cambiamenti osservati



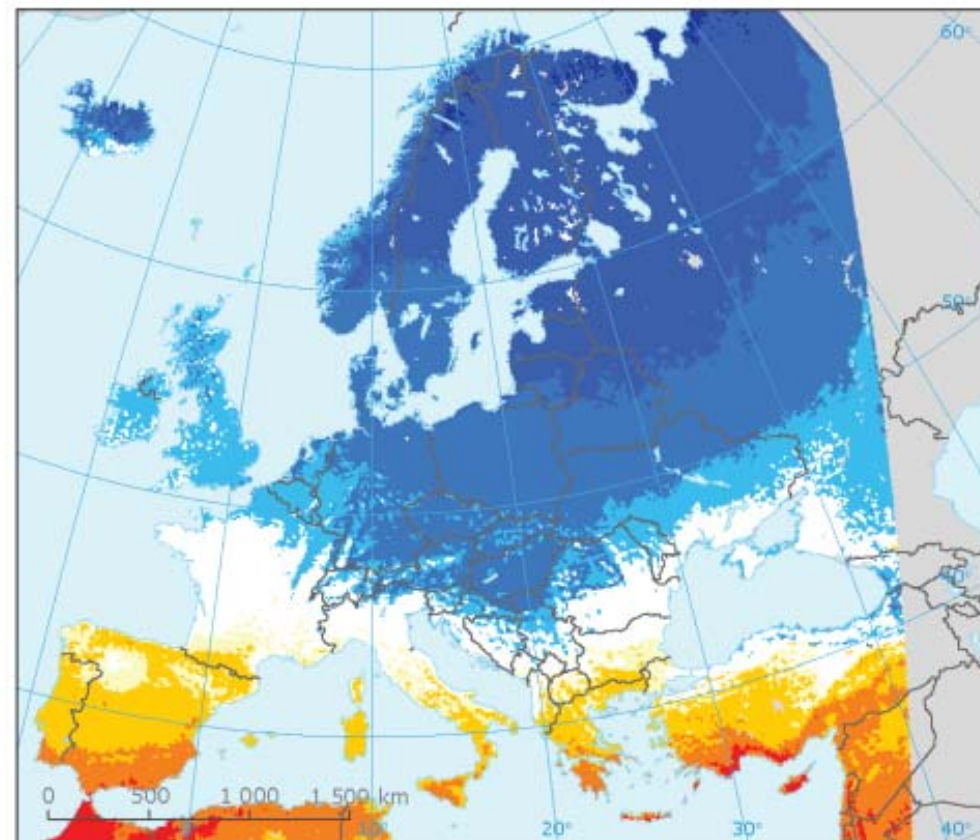
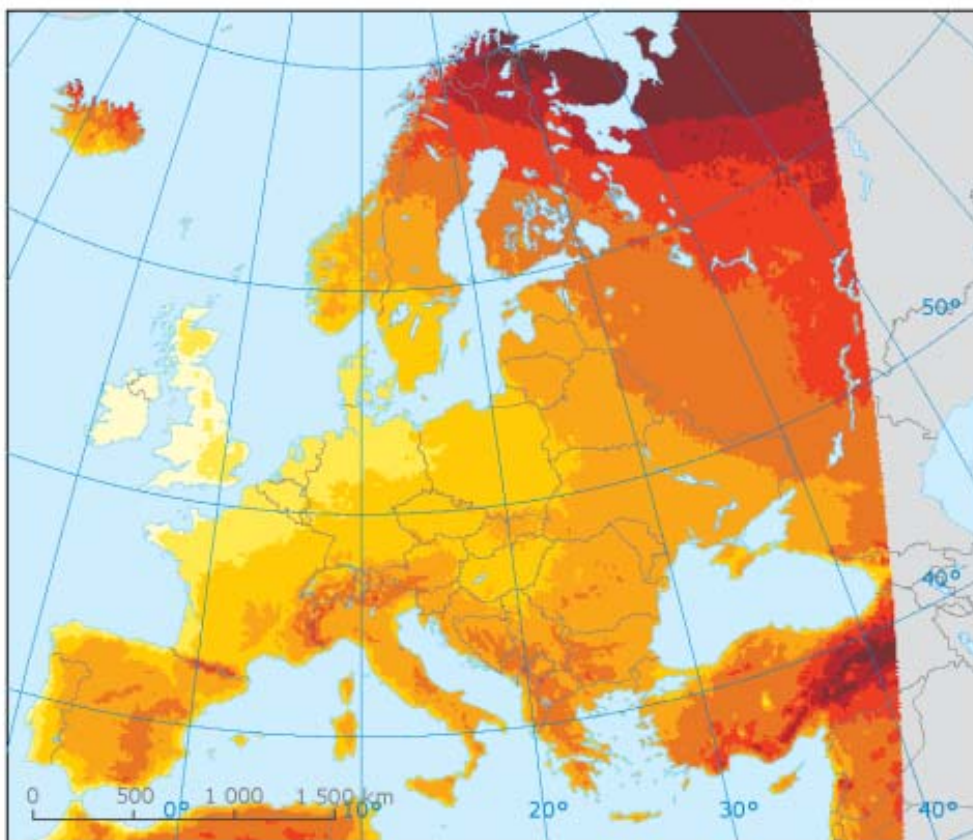
Observed temperature change over Europe during the period 1976–2006

Left: annual mean; middle: winter (DJF); right: summer (JJA)

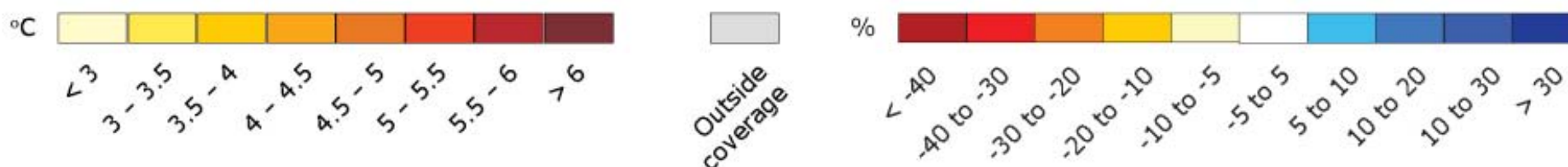
°C per decade



Previsioni Euro-CORDEX



Projected changes in annual mean temperature (left) and annual precipitation (right)



IPCC Special Report on Global Warming of 1.5 °C (SR1.5)

A **mix of mitigation and adaptation options** implemented in a participatory and integrated manner can enable rapid, systemic transitions in urban and rural areas that are necessary elements of an accelerated transition to **1.5°C** worlds.

Such options and changes are most effective when aligned with economic and sustainable development, and when local and regional governments are supported by national governments

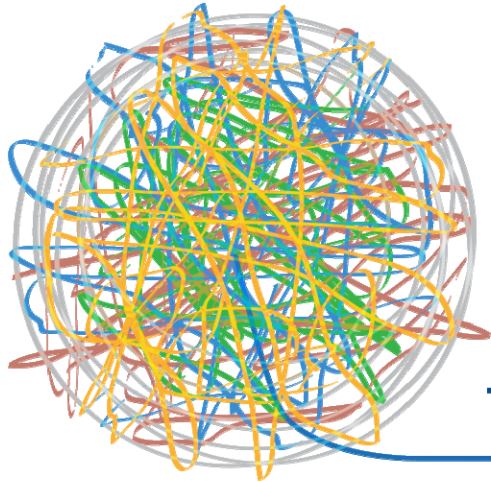
Any increase in global warming (e.g., > + 0.5°C) will affect human health (*high confidence*). Risks will be lower at **1.5°C** than at **2°C** for heat-related morbidity and mortality (*very high confidence*), **particularly in urban areas** because of urban heat islands (*high confidence*).

Conclusioni

- Descrizione dei bassi strati atmosferici
- Lo strato limite in area urbana
- Condizioni meteo-climatiche sfavorevoli
- Strumenti di osservazione e di previsione
- Uno sguardo agli scenari climatici

Grazie per l'attenzione!

..... domande?



+COMMUNITY

UNA PIATTAFORMA INTELLIGENTE
PER LO SVILUPPO DEI TERRITORI



Dr. Giuseppe Frustaci

Fondazione Osservatorio Meteorologico Milano Duomo