



Copertina

# Corso di Fisica dello Strato Limite Atmosferico

Introduzione al corso,  
concetti fondamentali  
e  
motivazioni

Giaiotti Dario & Stel Fulvio



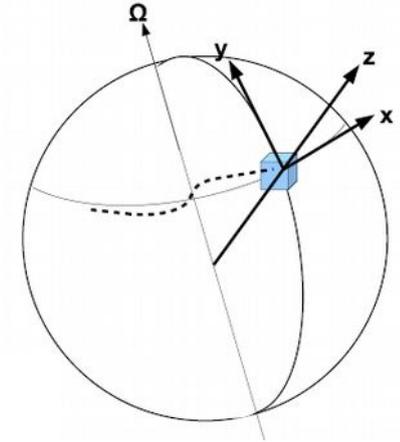
## Sommario della lezione

- Concetti fondamentali che portano alla definizione dello Strato Limite Atmosferico
- Definizione di Strato Limite Atmosferico
- Motivazioni allo studio dello Strato Limite Atmosferico

## Fluidodinamica geofisica e fisica dello strato limite atmosferico

Le equazioni di conservazione usate in fluidodinamica geofisica, generalmente non considerano gli effetti del **confinamento** del fluido atmosferico.

Questi effetti sono considerati nella fisica dello strato limite.



Principi di conservazione

quantità di moto

energia massa

$$\frac{du}{dt} - \frac{uv \tan(\phi)}{R} + \frac{uw}{R} = 2\Omega v \sin(\phi) - 2\Omega w \cos(\phi) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}$$

$$\frac{dv}{dt} + \frac{u^2 \tan(\phi)}{R} + \frac{vw}{R} = -2\Omega u \sin(\phi) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y}$$

$$\frac{dw}{dt} - \frac{u^2 + v^2}{R} = 2\Omega u \cos(\phi) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g$$

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0$$

$$\frac{d\eta}{dt} = C_p \frac{dT}{dt} - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt}$$

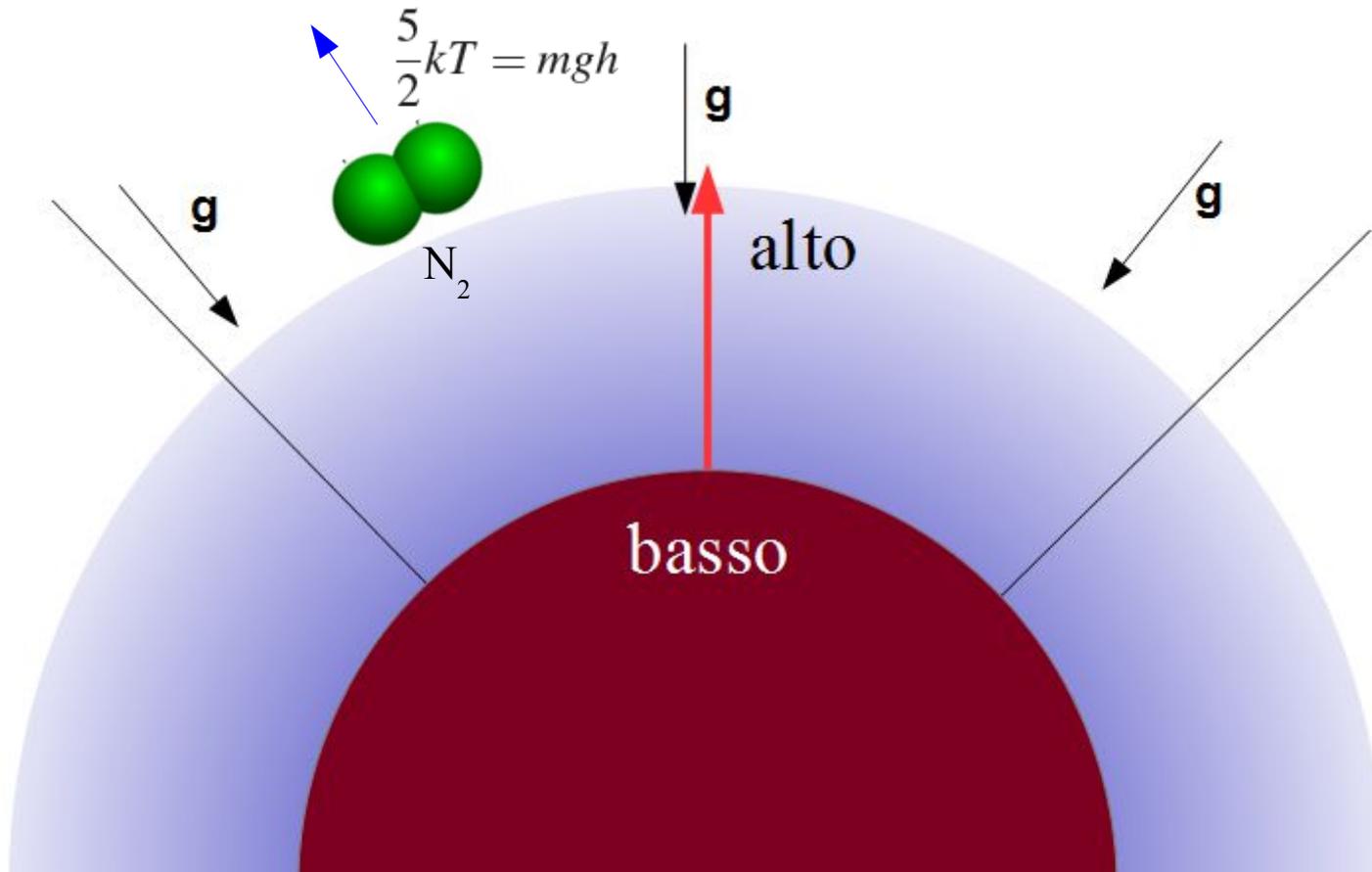
includere  
gli effetti del  
confinamento

equazione di stato

$$p = \rho RT$$

## L'atmosfera terrestre è un fluido confinato

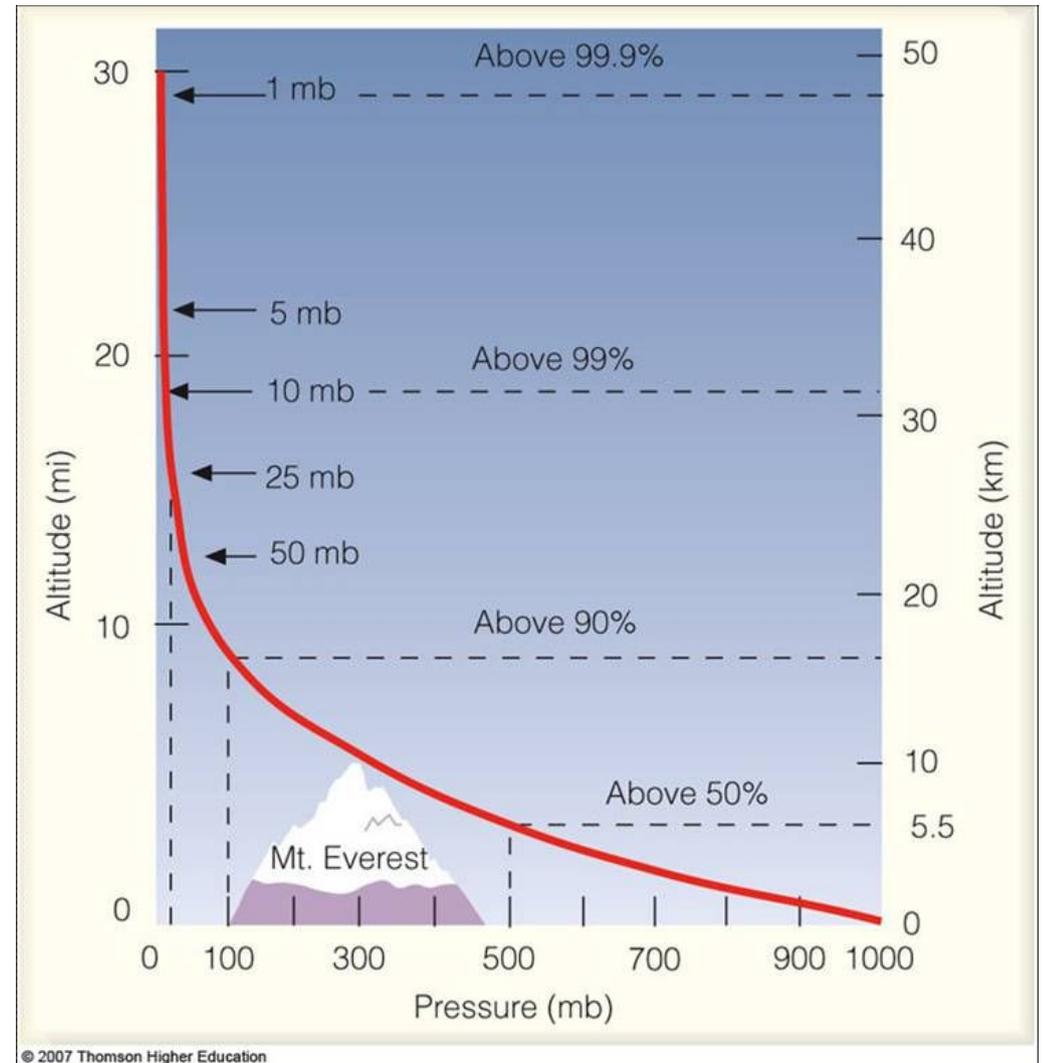
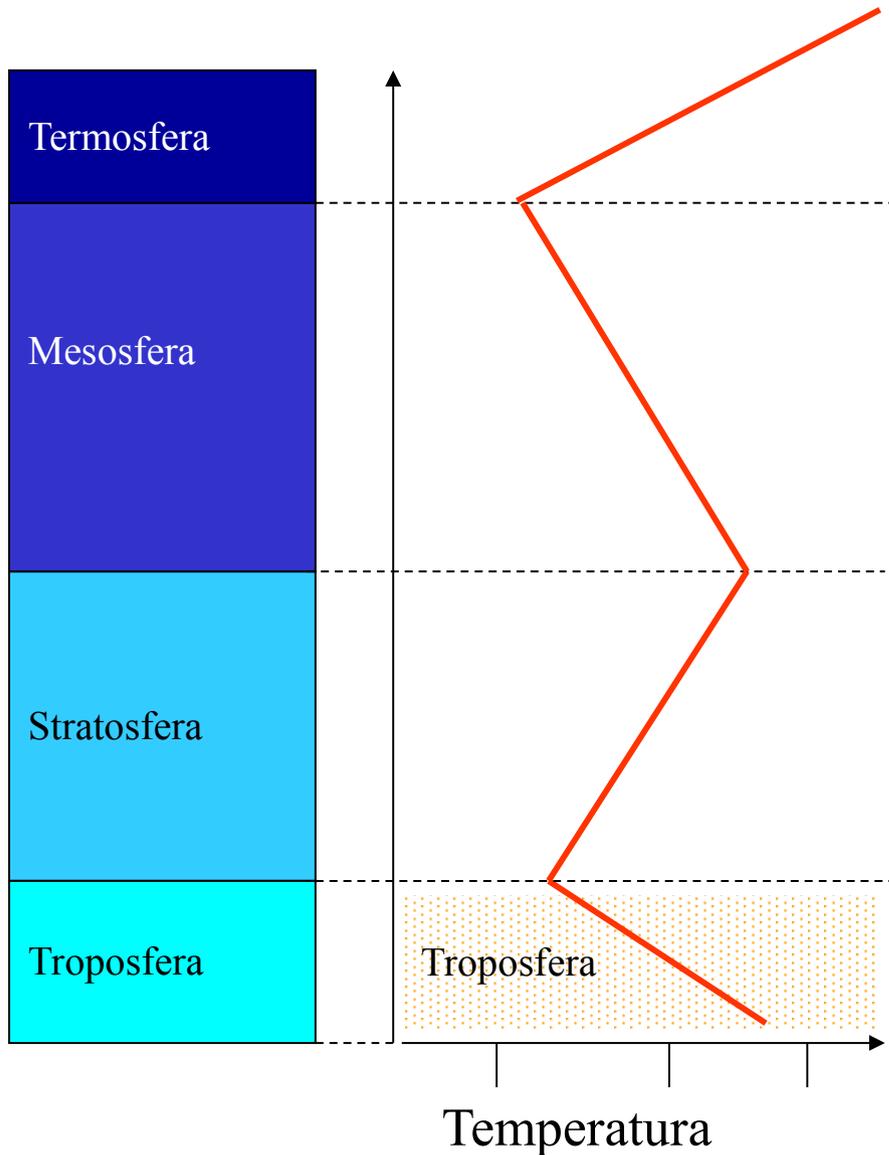
L'accelerazione di gravità definisce una direzione ed un verso privilegiati nel sistema fisico.



- L'atmosfera è confinata dal **basso** da una superficie facilmente definibile
- L'atmosfera non è confinata dall'**alto**, ma per convenienza viene definita una superficie che la limita

## Il limite superiore dell'atmosfera

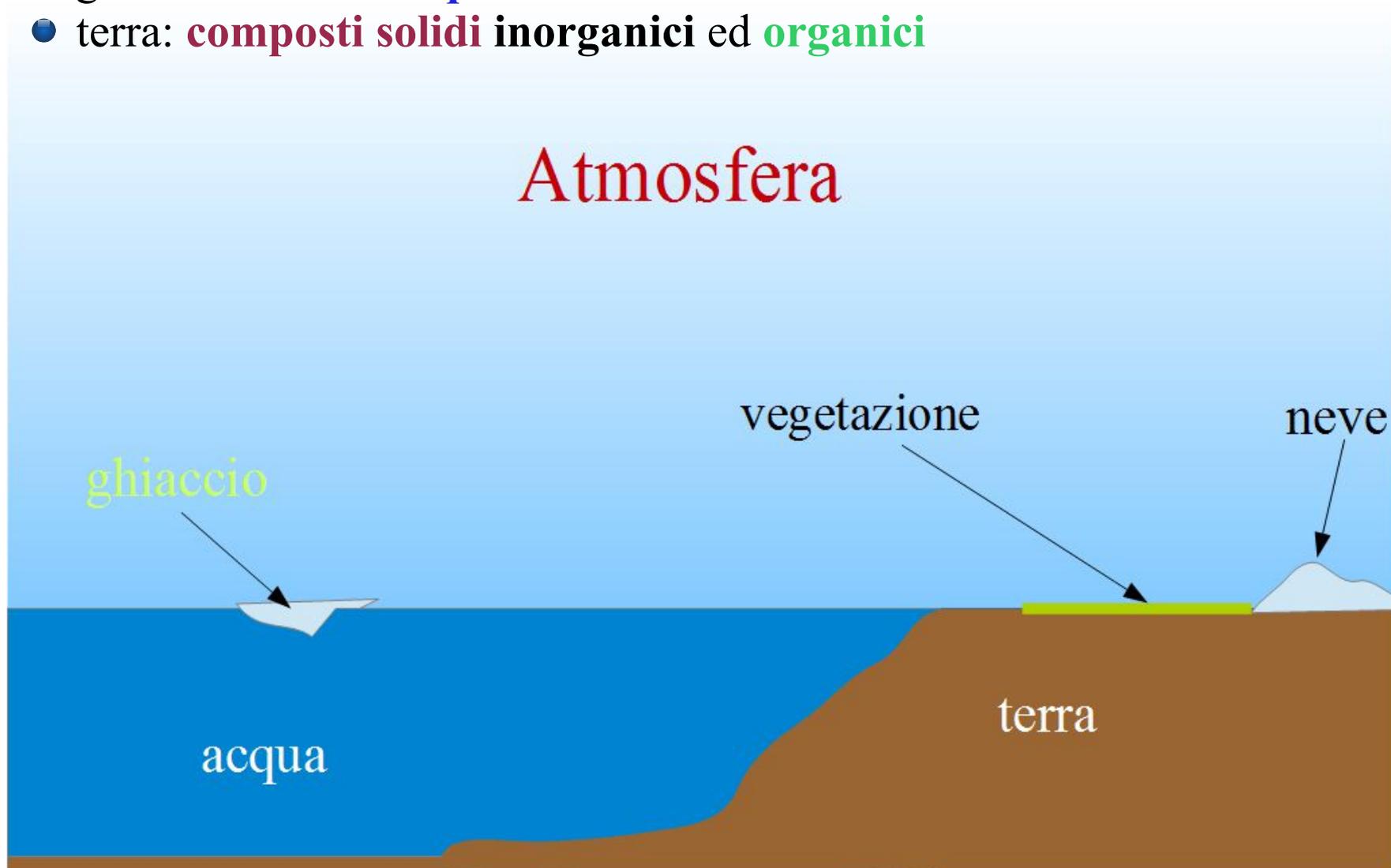
La scelta del limite superiore dipende dai processi fisici che si intende studiare



## Il limite inferiore dell'atmosfera: la superficie terrestre

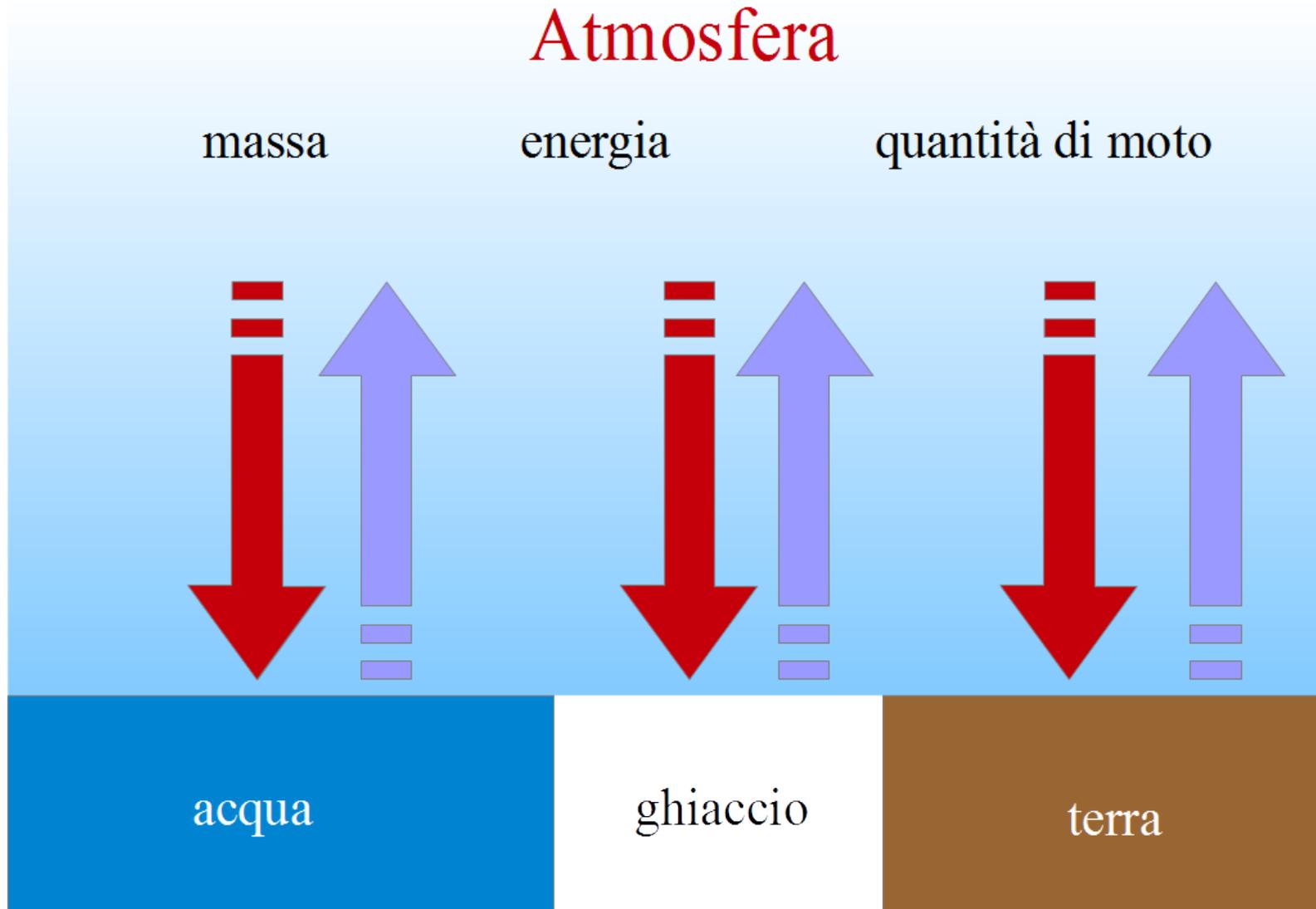
La superficie terrestre è la superficie che, dal basso, separa l'atmosfera da altri mezzi:

- oceani, mari, laghi, fiumi: **acqua** allo stato liquido (soluzioni acquose)
- ghiaccio e neve: **acqua** allo stato solido
- terra: **composti solidi inorganici** ed **organici**



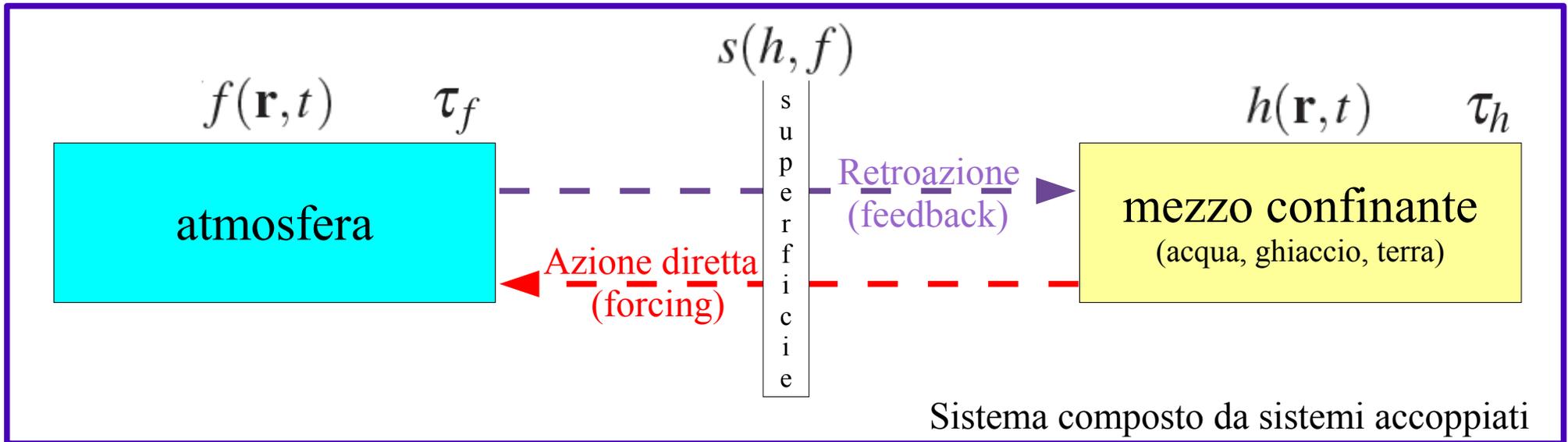
## Lo scambio di proprietà tra l'atmosfera e la superficie terrestre

Considerando i principi di conservazione, attraverso la superficie terrestre avvengono degli scambi di proprietà tra atmosfera e gli altri mezzi che la confinano



## Accoppiamento tra atmosfera terrestre e il mezzo che la confina

In generale, i problemi che la fisica dello strato limite atmosferico deve affrontare sono quelli di sistemi fisici accoppiati ed interagenti



$$\frac{df(\mathbf{r}, t)}{dt} = G(\mathbf{r}, t, s(h, f))$$

$$\frac{dh(\mathbf{r}, t)}{dt} = M(\mathbf{r}, t, s(h, f))$$

Sistemi accoppiati

$$\frac{df(\mathbf{r}, t)}{dt} = G(\mathbf{r}, t, s(h)) \quad \tau_f \ll \tau_h$$

$$\frac{dh(\mathbf{r}, t)}{dt} = M(\mathbf{r}, t) + \text{boundary conditions}$$

Sistemi NON accoppiati

$$\frac{df(\mathbf{r}, t)}{dt} = G(\mathbf{r}, t)$$

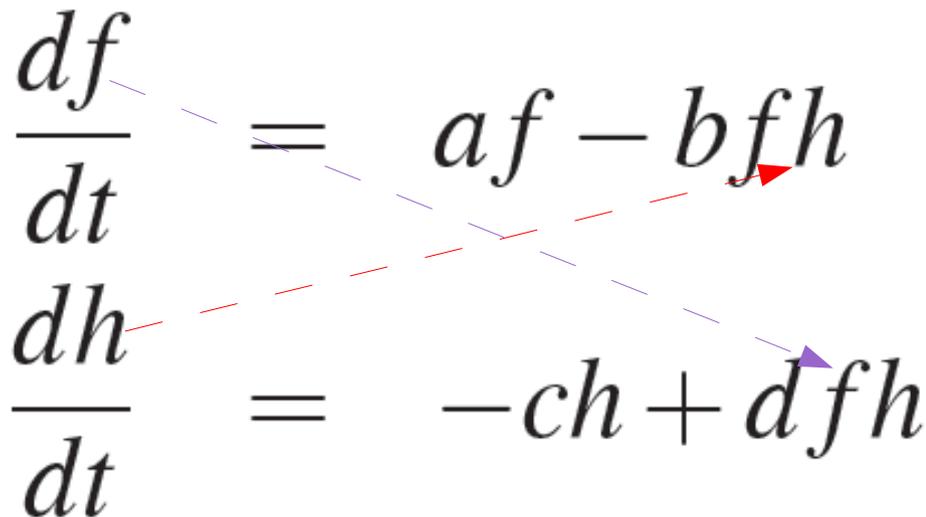
+ boundary conditions

Sistema isolato

## Esempio di sistemi accoppiati ed interagenti

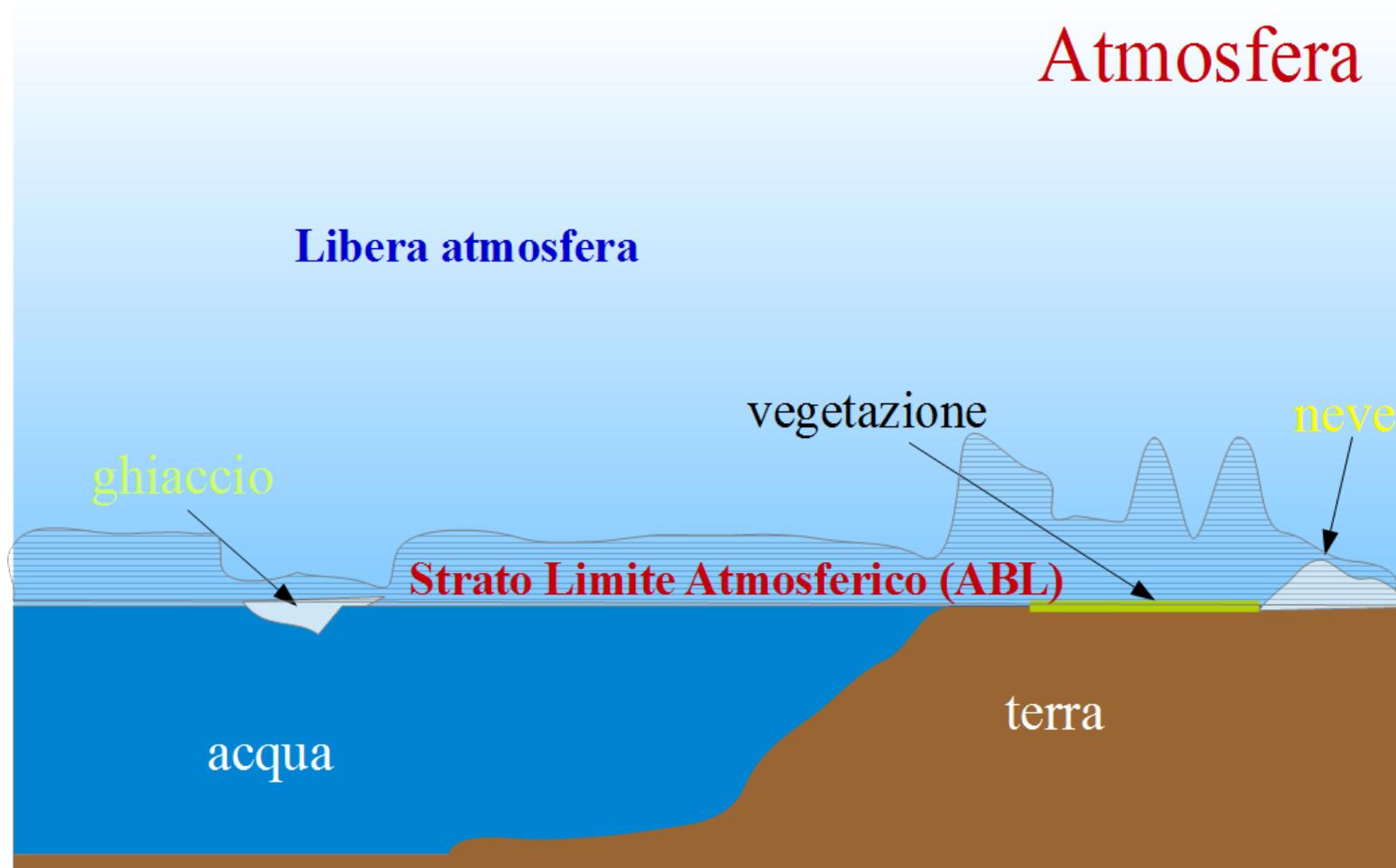
### Esercizio

Considerate il seguente sistema composto da due sistemi accoppiati ed interagenti e studiate le soluzioni di  $f$  e  $h$  su un piano  $(f,h)$ . Eseguite delle integrazioni numeriche per diversi valori dei parametri  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$ .

$$\begin{aligned} \frac{df}{dt} &= af - bfh \\ \frac{dh}{dt} &= -ch + dfh \end{aligned}$$


## Definizione di strato limite atmosferico (Atmospheric Boundary Layer)

Lo strato limite atmosferico è quella regione di atmosfera terrestre che è direttamente influenzata dalla superficie terrestre



Questa affermazione che è generale e apparentemente qualitativa, viene contestualizzata in proposizioni quantitative per mezzo delle equazioni di conservazione che descrivono, spesso solo parzialmente, il sistema accoppiato atmosfera – mezzo confinante dal basso.

## Molteplicità delle notazioni sullo Strato Limite Atmosferico (ABL)

La complessità dei problemi e delle interazioni tra atmosfera e la superficie terrestre inducono a trattare particolari classi di ABL, per le quali solo alcune interazioni sono considerate significative.

Per ciascuna classe lo strato limite atmosferico viene indicato con un nome specifico che spesso è noto ai soli specialisti della classe

- ABL (Atmospheric Boundary Layer)
- PBL (Planetary Boundary Layer)
- NBL (Nocturnal Boundary Layer)
- SBL (Stable Boundary Layer)
- CBL (Convective Boundary Layer)
- TBL (Tropical Boundary Layer)
- AABL (Arctic Atmospheric Boundary Layer)
- .....

## Scopo della fisica dello strato limite atmosferico

Comprendere e costruire modelli dinamici e termodinamici dei processi di interazione tra l'atmosfera terrestre e lo superficie terrestre.

Gli approcci alle problematiche del ABL avvengono tramite:

- **misura**: in situ e indirette con tecniche di remote sensing
- **teoria**: modellazione dei processi fisici e chimico-fisici
- **simulazione numerica**: casi ideali e casi reali tramite:
  - LAM (Limited Area Model);
  - LES (Large Eddy Simulations),

## Importanza dello studio e della modellazione dello strato limite atmosferico

I motivi che portano ad investire risorse nello studio dello strato limite atmosferico sono parecchie. Ecco un elenco:

- una buona parte degli esseri viventi, Uomo compreso, vive immerso nel ABL;
- miglioramento delle previsioni del tempo (0–10 giorni – cicloni tropicali/extra tropicali);
- miglioramento delle previsioni stagionali (1 – 4 mesi);
- miglioramento degli scenari climatici futuri (100 anni);
- miglioramento della previsione di inquinamento dell'aria e dei mari;
- miglioramento della previsione dei processi di produzione di energia (energia eolica);
- aumento della sicurezza nella navigazione aerea, (specie per il decollo e dell'atterraggio);
- aumento della sicurezza nella navigazione marittima (onde e visibilità);
- comprensione e previsione della meteorologia urbana (megalopoli e green edification);
- comprensione dei processi di produzione del cibo (modelli di agricoltura e allevamento);
- comprensione degli aspetti fondamentali della turbolenza nei fluidi;
- comprensione dei processi di interazione fluido superficie (dal micro al macro);
- microfisica delle nubi (nuclei di condensazione, condensazione e sublimazione)

## Miglioramento delle previsioni del tempo (0–10 giorni – temperature, visibilità, piogge)

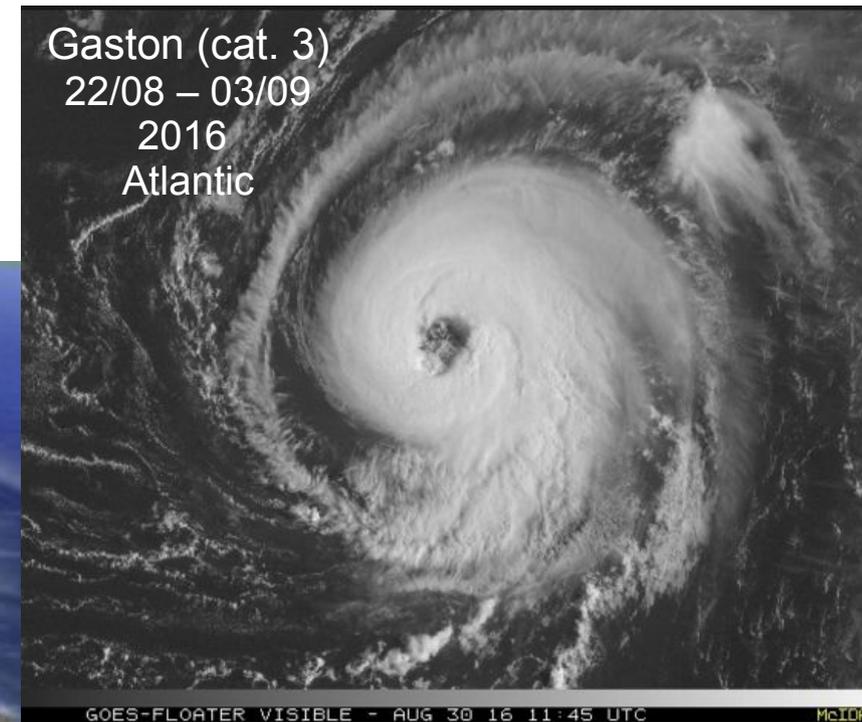
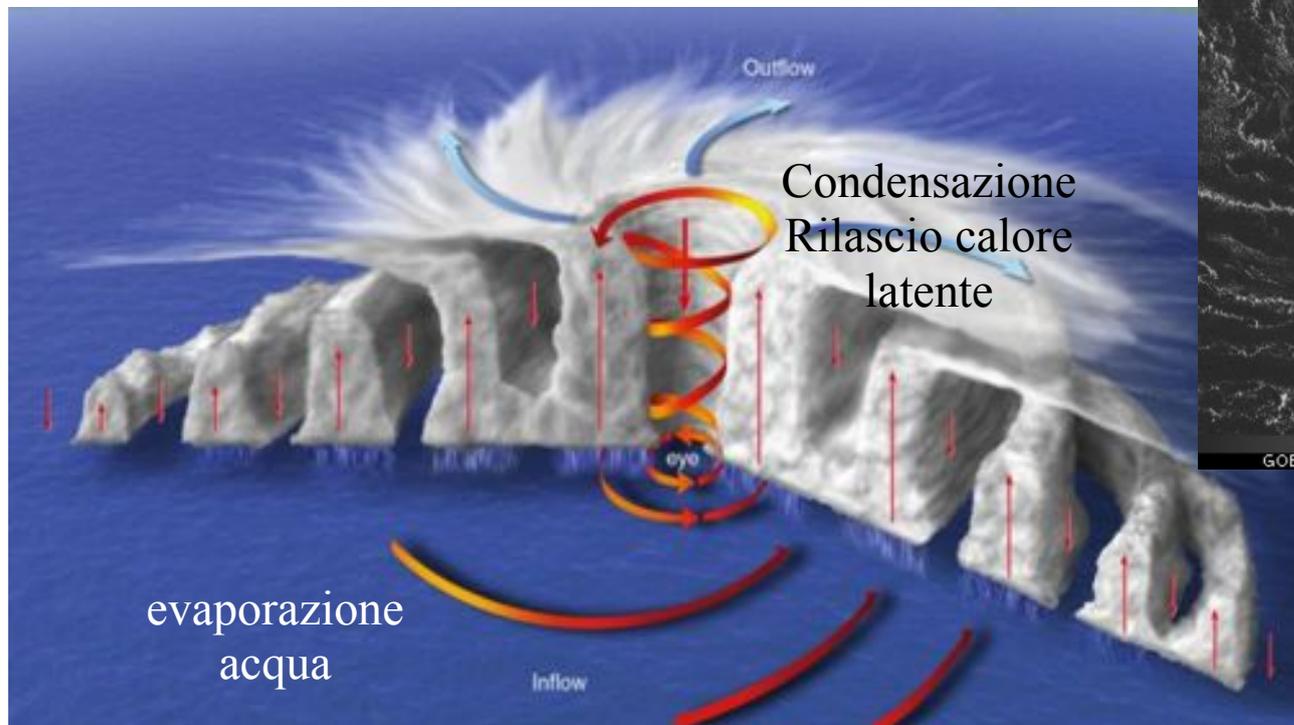


In molti casi nubi e precipitazioni  
si sviluppano nel ABL

Modelli globali 12 km 14

Modelli LAM 1 o 2 km

## Miglioramento delle previsioni del tempo (0–10 giorni – cicloni tropicali)



L'alimentazione dei cicloni tropicali avviene dalla superficie del mare.

La previsione del ABL sui mari tropicali è essenziale per la previsione della formazione e l'evoluzione dei cicloni tropicali

## Miglioramento delle previsioni del tempo (0–10 giorni – convezione atmosferica profonda)

Risiedono nel ABL:

- l'innescò della convezione atmosferica profonda
- le condizioni ambientali per la formazione di celle temporalesche intense e rotanti



$$-2g \int_{LFC}^{EL} \frac{(T_0 - T)}{T_0} dz = 2 CAPE$$

## Miglioramento delle previsioni stagionali (1 – 4 mesi)

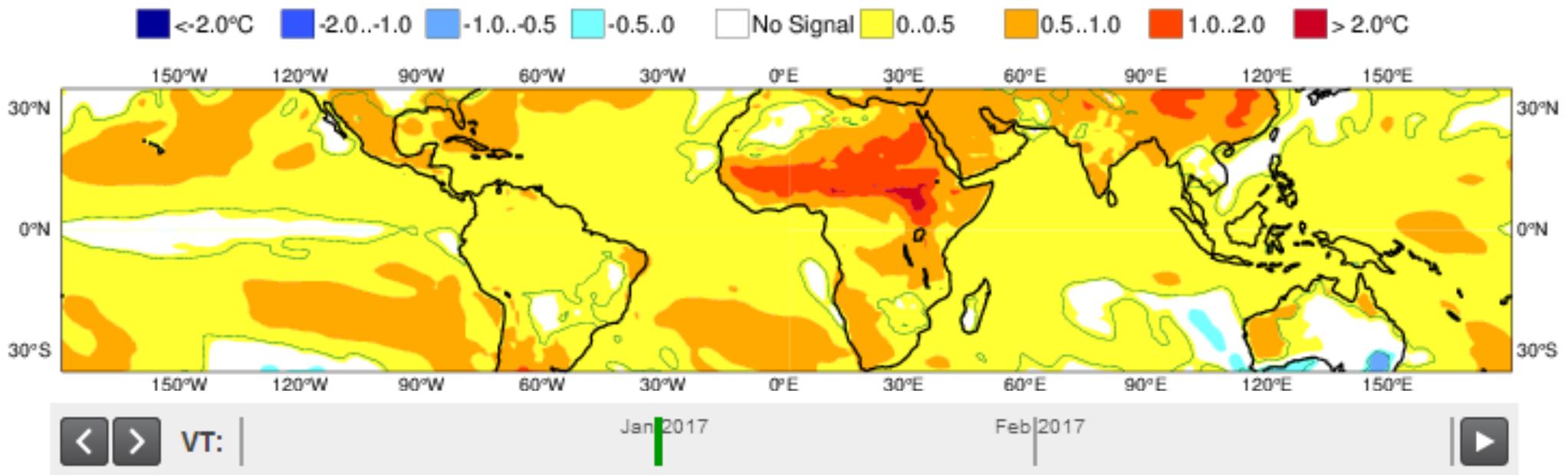
Le previsioni stagionali, nella modellistica numerica, sono fortemente dipendenti dall'umidità del suolo, dalla copertura nevosa e dalla temperatura superficiale degli oceani e del ghiaccio marino.

I modelli globali generalmente simulano strati limite stabili con eccessivo rimescolamento turbolento, causando errori sistematici nell'altezza dello strato limite notturno o invernale.

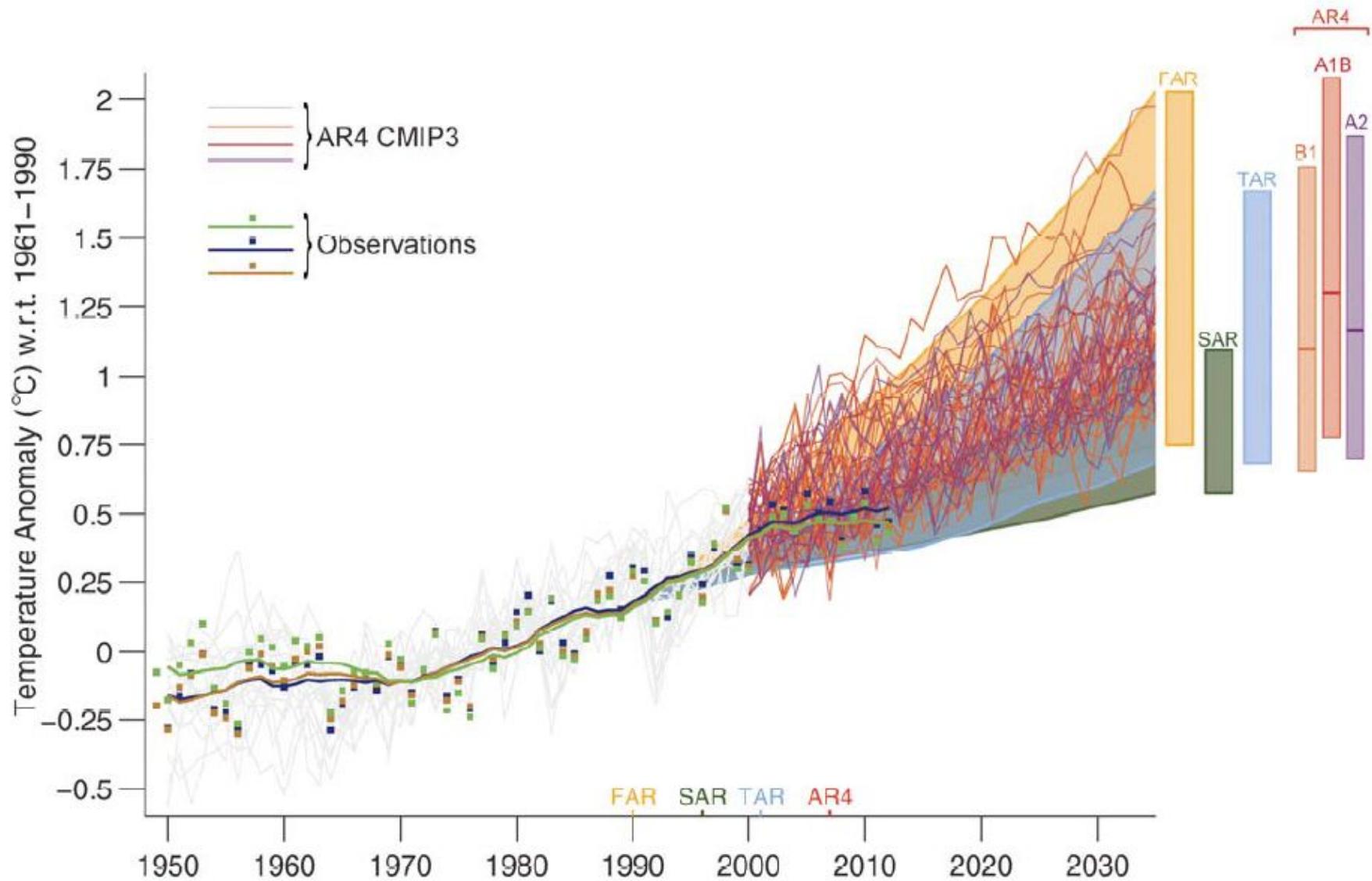
Invece strati limite tropicali convettivi più sviluppati in verticale modificano la struttura delle precipitazioni e aumentano il trasporto del calore latente dai mari all'atmosfera

ECMWF Seasonal Forecast  
Mean 2m temperature anomaly  
Forecast start reference is 01/09/16  
Ensemble size = 51, climate size = 450

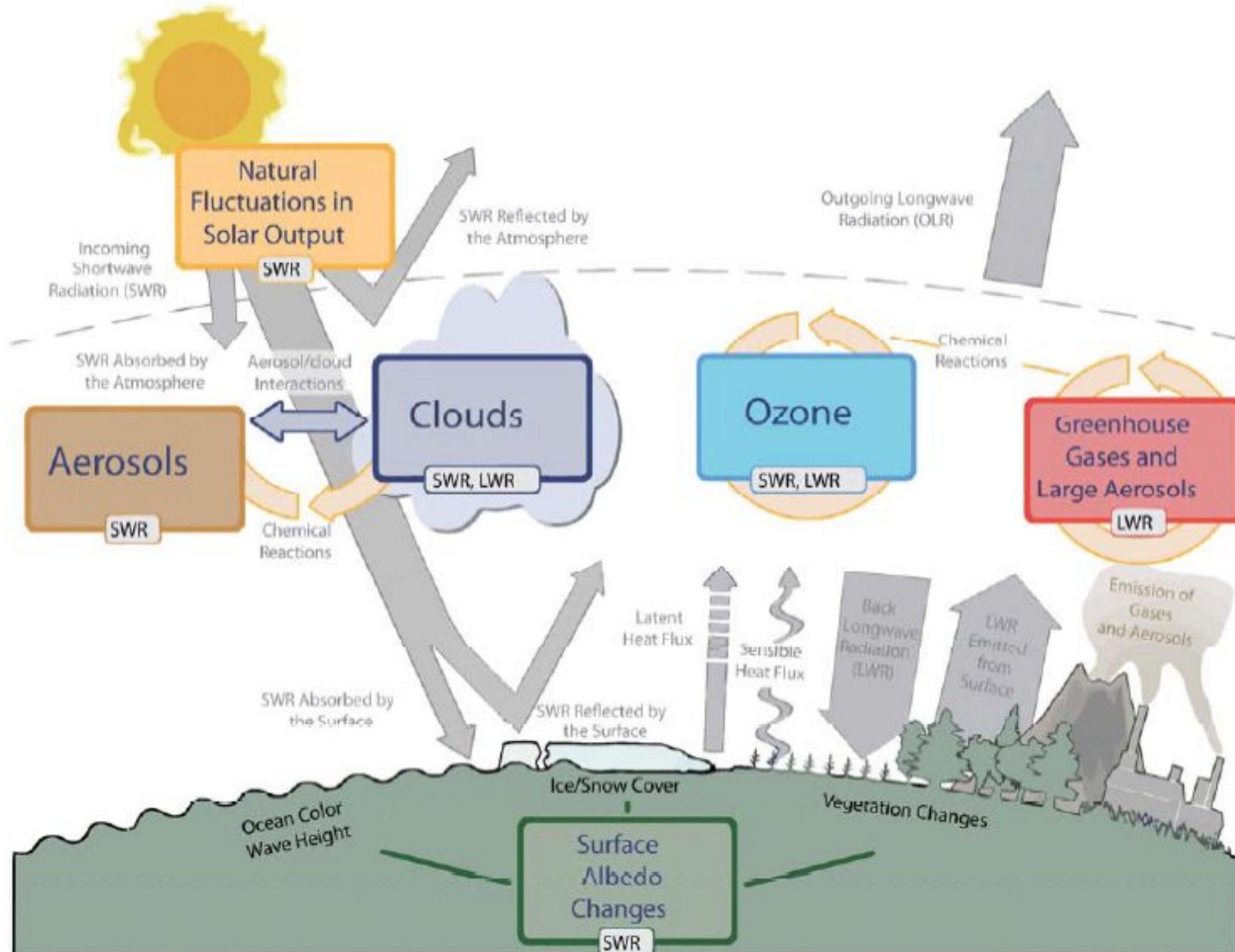
System 4  
NDJ 2016/17  
Shaded areas significant at 10% level  
Solid contour at 1% level



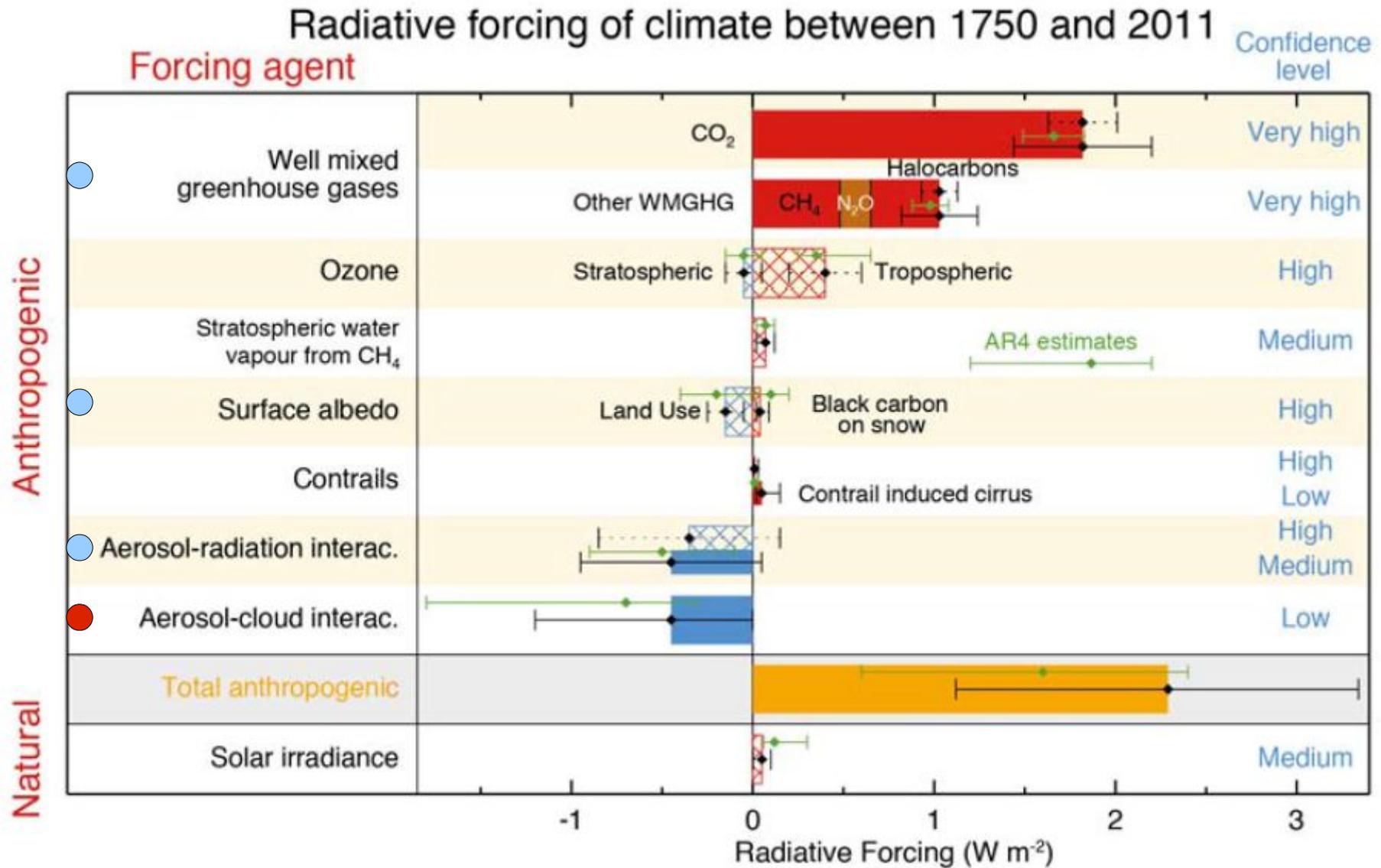
## L'indeterminazione delle previsioni di scenari climatici futuri



## Gli scenari climatici futuri dipendono anche dalla modellazione del ABL



## Scenari climatici futuri dipendono dalla modellazione del ABL – ruolo delle nubi



## Miglioramento degli scenari climatici futuri (100 anni)

- Anche errori relativi molto piccoli, ma sistematici nella descrizione dei processi tipici dello strato limite atmosferico possono portare a scenari climatici futuri non realistici
- L'accoppiamento dei sistemi oceano-atmosfera-terra è essenziale per eseguire simulazioni atmosferiche di tipo climatico. Tale accoppiamento avviene con processi residenti nel ABL.

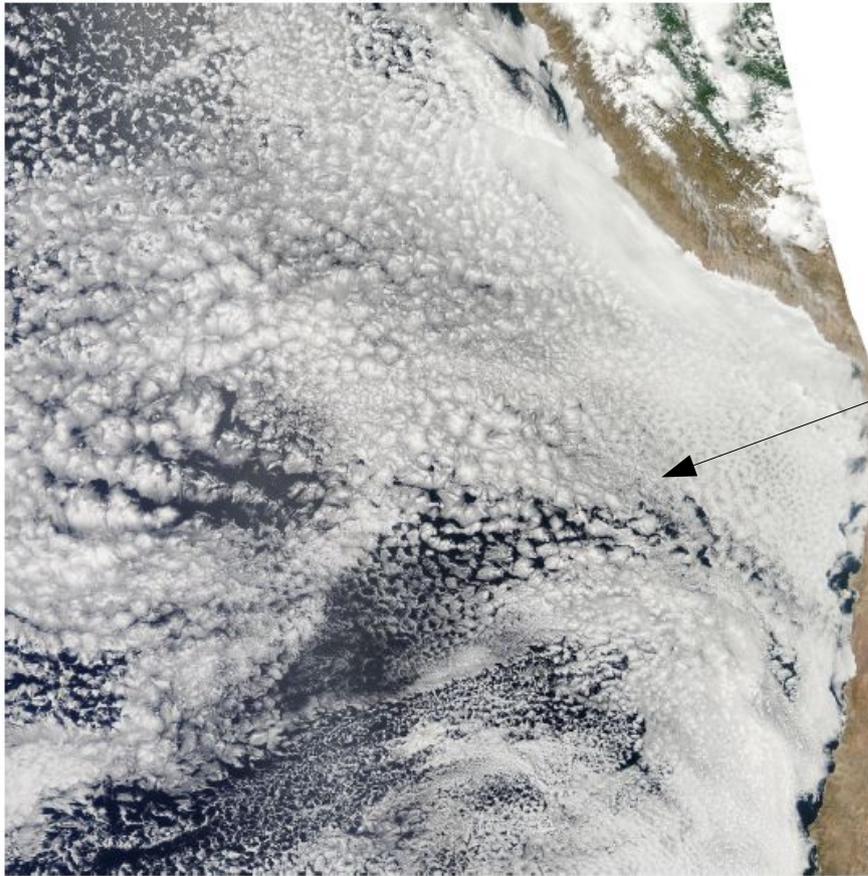


FIGURE 2: Visible satellite image from the NASA Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer to the west of South America showing closed and open cell stratocumulus clouds. A band of stratus clouds is present along the Peruvian coastline. The image scale is approximately 2000 km across.

Alcuni esempi:

- L'assorbimento di CO<sub>2</sub> negli oceani,
- La presenza di nubi e gli effetti radiativi.

Gli stratocumuli sono le nubi più frequenti sul nostro pianeta e coprono mediamente 1/5 della superficie:

- 23% sugli oceani
- 12% sulla terra

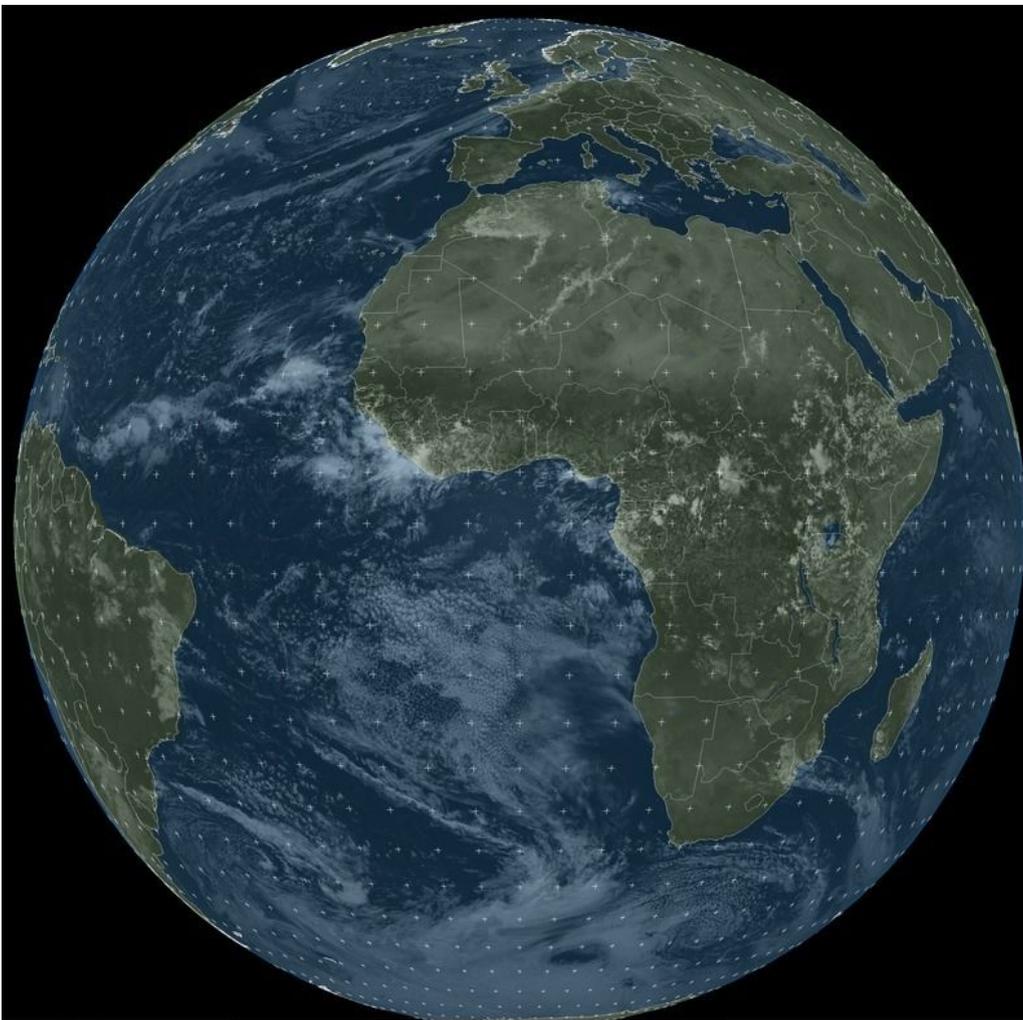
Gli strati sono le nubi più frequenti sul nostro pianeta e coprono mediamente 1/10 della superficie:

- 12% sugli oceani
- 5% sulla terra

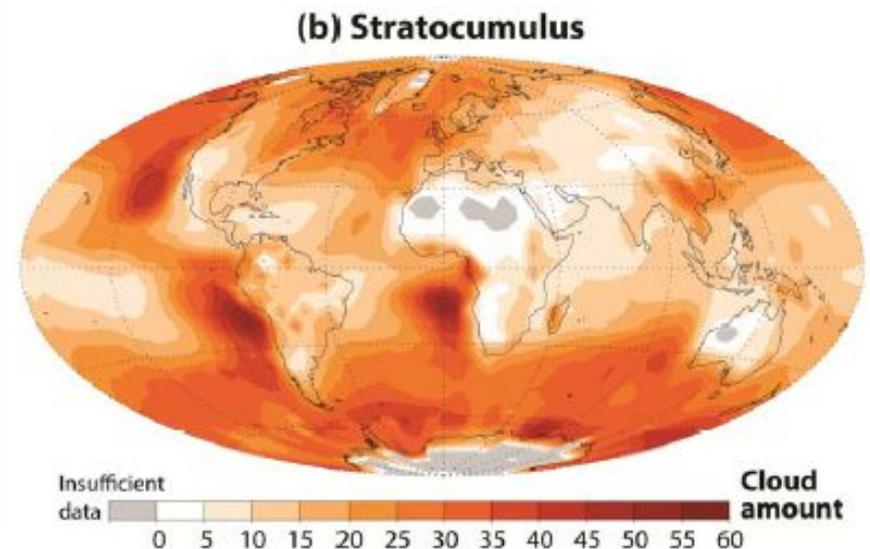
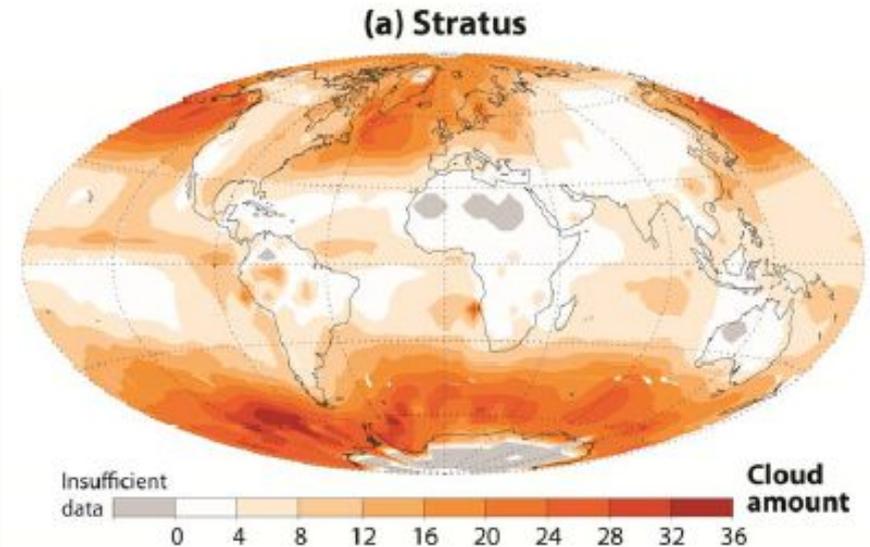
Gli strati e gli stratocumuli riflettono buona parte della radiazione solare entrante, quindi sono attori principali nel bilancio radiativo. Questo tipo di nubi si sviluppa nello strato limite atmosferico

## Il tipo di nubi più frequenti sul pianeta

Gli strati e gli stratocumuli riflettono buona parte della radiazione solare entrante, quindi sono attori principali nel bilancio radiativo.

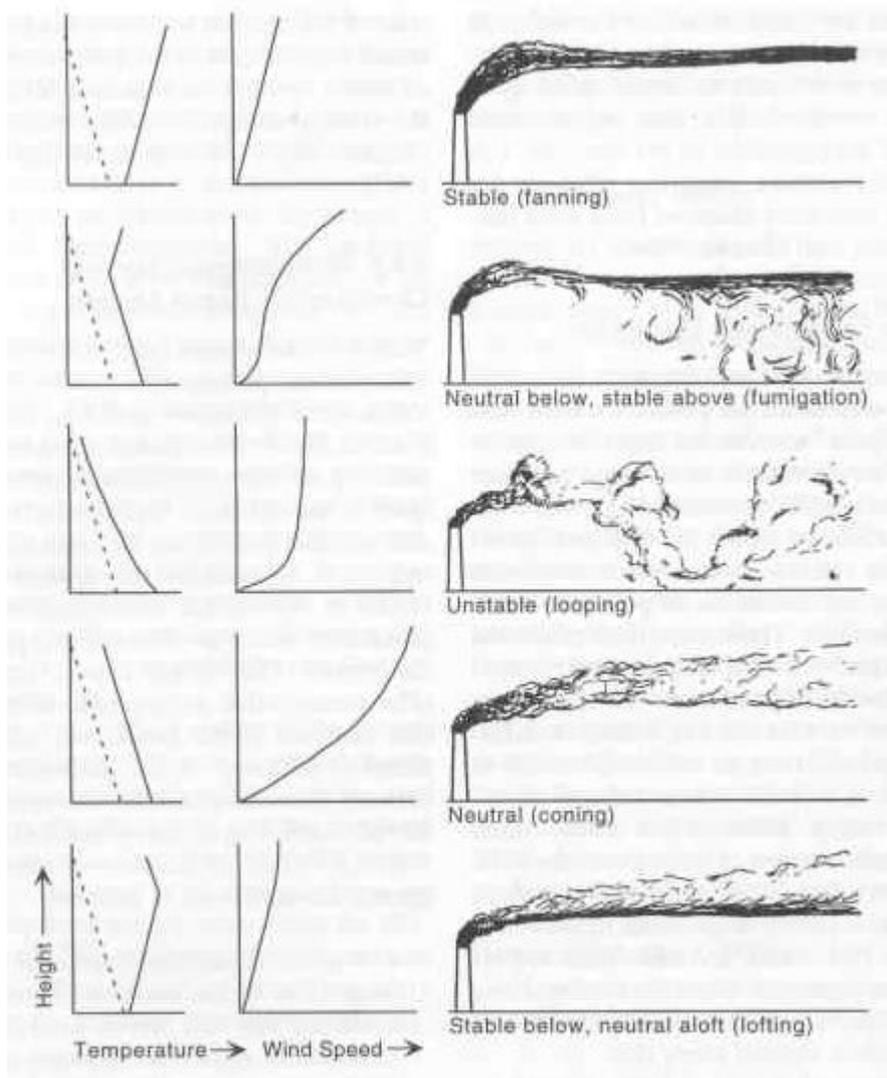


Percentuale media annuale di copertura nuvolosa da (a) strati; (b) stratocumuli. Dataset Warren et al. (1986, 1988).



## Miglioramento della previsione di inquinamento dell'aria e dei mari

Il trasporto e la dispersione degli inquinanti immessi nell'atmosfera e la velocità con cui essi si depositano alla superficie, o reagiscono con essa, dipendono dalle proprietà dell'ABL



## Miglioramento della previsione dei processi di produzione di energia (energia eolica e solare)

Batterie di generatori eolici producono scie di turbolenze in funzione dello stato del ABL. Tali scie riducono l'efficienza del trasferimento della quantità di moto dall'aria alle eliche

La presenza di nubi e di polveri sospese riduce la produzione di energia in impianti fotovoltaici



Modelli di evoluzione della turbolenza nel ABL in presenza di ostacoli permettono la progettazione di impianti eolici.

## Aumento della sicurezza nella navigazione aerea

Gli aerei decollano ed atterrano nel ABL, frequentemente uno di seguito all'altro.

Le navi si muovono nel ABL.

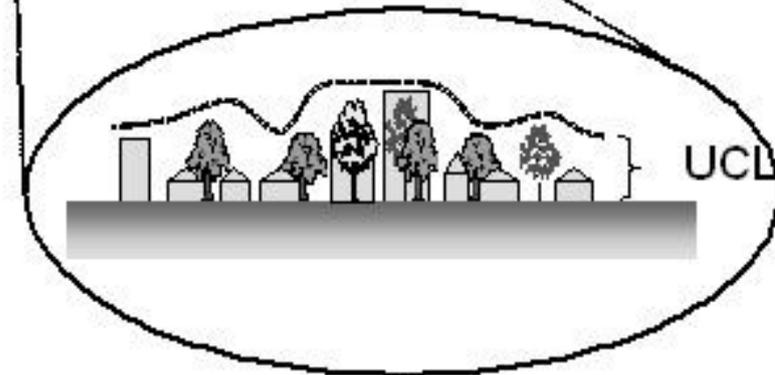
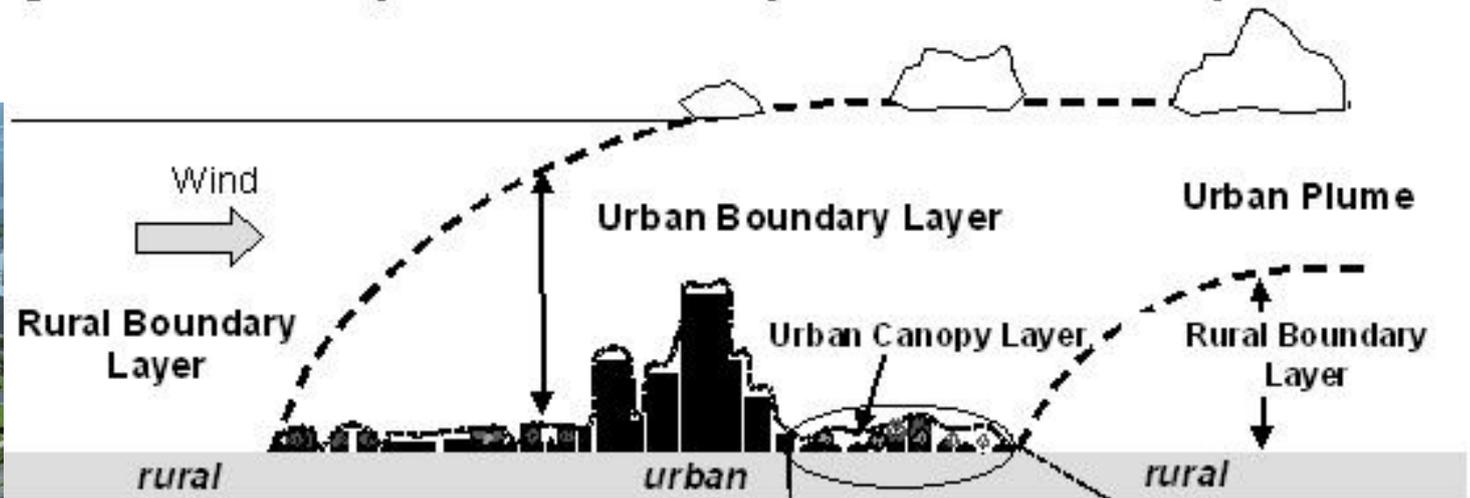


- Turbolenza
- Visibilità
- Onde superficiali nel mare

## Comprensione e previsione della meteorologia urbana (megapoli e green edification);

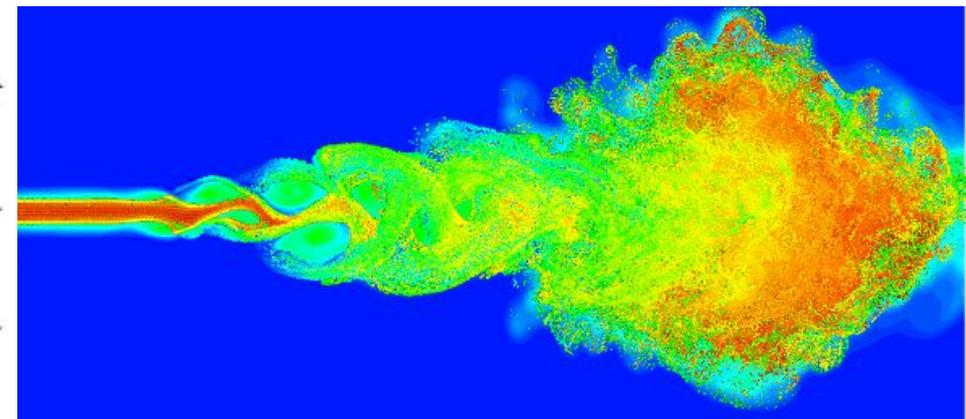
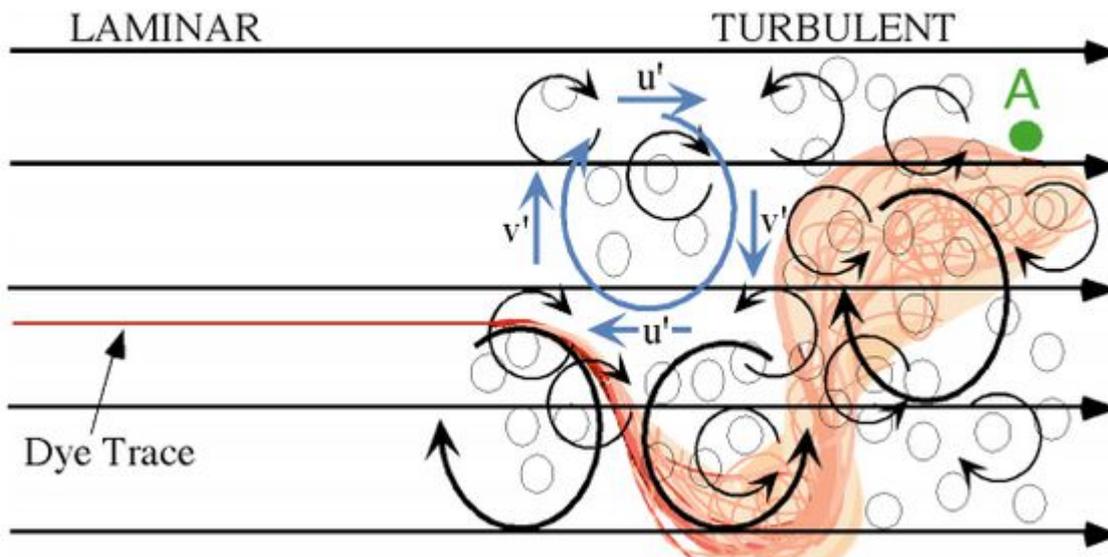
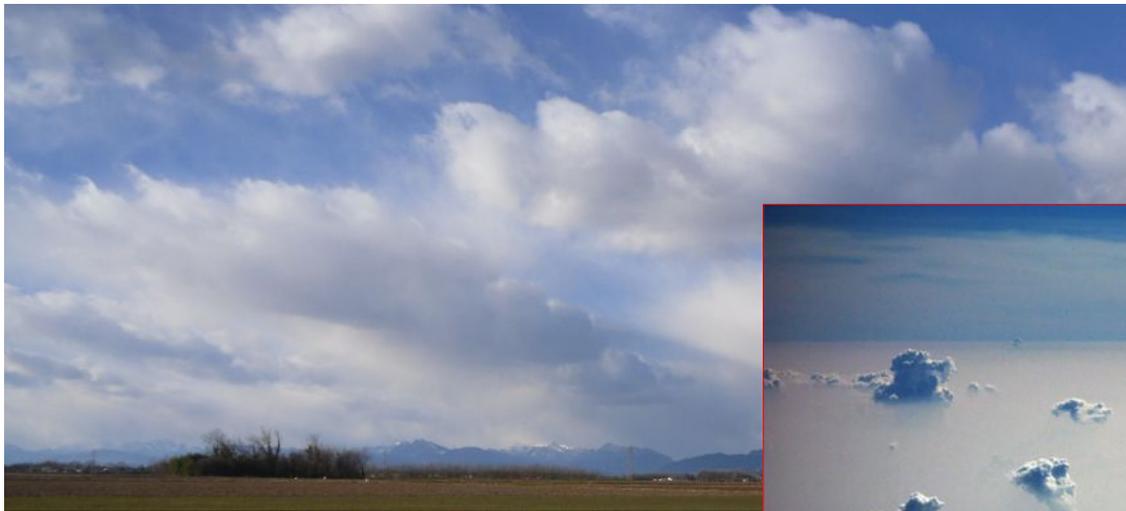
La presenza di edifici e la cementificazione di vaste aree modifica considerevolmente lo strato limite atmosferico, inoltre ogni megalopoli presenta delle peculiarità con conseguenze importanti sull'aria (respirata).

Figure 1. Schematic depiction of the main components of the urban atmosphere.



## Comprensione degli aspetti fondamentali della turbolenza nei fluidi

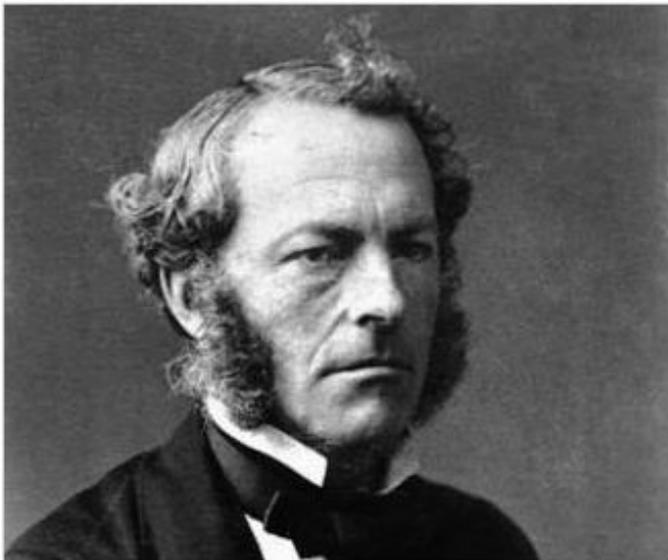
Lo strato limite atmosferico è un laboratorio naturale nel quale studiare la turbolenza



## Comprensione degli aspetti fondamentali della fluidodinamica

Restano ancora importanti questioni teoriche da affrontare nella fluidodinamica. Tali questioni emergono con grande evidenza nella modellazione dello strato limite atmosferico

### Navier–Stokes Equation



Waves follow our boat as we meander across the lake, and turbulent air currents follow our flight in a modern jet. Mathematicians and physicists believe that an explanation for and the prediction of both the breeze and the turbulence can be found through an understanding of solutions to the Navier-Stokes equations. Although these equations were written down in the 19th Century, our understanding of them remains minimal. The challenge is to make substantial progress toward a mathematical theory which will unlock the secrets hidden in the Navier-Stokes equations.

Image: Sir George Gabriel Stokes (13 August 1819–1 February 1903). Public Domain

**This problem is:**      Unsolved

#### Rules:

Rules for the Millennium Prizes

#### Related Documents:

 Official Problem Description

#### Related Links:

Lecture by Luis Caffarelli