

Meteorologia  
Una breve panoramica

Federico Cassola  
federico.cassola@arpal.liguria.it

ARPAL CFMI-PC

5 marzo 2021

# Struttura del corso

- Breve introduzione generale
- Termodinamica dell'atmosfera
- Dinamica dell'atmosfera
- Strato limite planetario
- Osservazioni in atmosfera
- Modellistica numerica
- Visita al Centro Funzionale

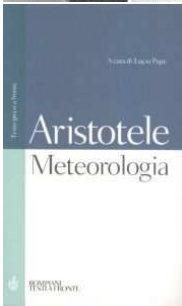
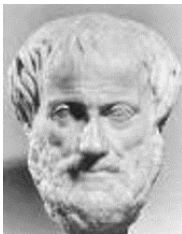
# Sommario I

- ① Struttura dell'atmosfera
  - Composizione
  - Distribuzione della massa
  - Profilo verticale
  - Troposfera
  - Strato limite planetario
  - Stratosfera
  - Mesosfera
  - Termosfera
  
- ② Circolazione Generale
  - Circolazione idealizzata a una cella
  - Circolazione idealizzata a tre celle
  - Caratteristiche principali
  - ITCZ
  - Correnti a getto
  - Instabilità baroclina e convettiva

## Sommario II

- 3 Fronti e cicloni
  - Tipologie di fronti
  - Ciclogenesi delle medie latitudini
  - Cicloni tropicali
  
- 4 Scala dei fenomeni atmosferici
  
- 5 Sistemi di osservazione in atmosfera
  
- 6 Modelli meteorologici
  - Equazioni fondamentali
  - Discretizzazione
  - Caos

# Meteorologia



- Il primo trattato organico sulla meteorologia (letteralmente studio dei fenomeni celesti) si deve ad Aristotele (384-322 a.C.)
- Separazione dei fenomeni atmosferici da quelli astronomici, importanti intuizioni sul ciclo dell'acqua e sui fenomeni di condensazione ed evaporazione
- Classificazione dei venti

La meteorologia oggi, nel suo significato più generale può includere gran parte delle materie che si occupano di fluidi geofisici: oceanografia, climatologia, ecc. Nell'ambito dell'atmosfera:

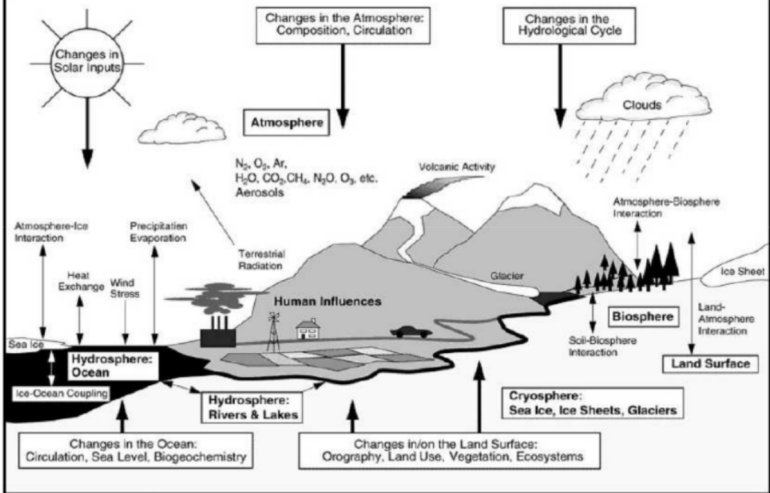
- Previsioni del tempo;
- Dispersione di inquinanti;
- Climatologia.

Le possibili applicazioni sono moltissime e in aumento ogni giorno (economia, salute, energia, pianificazione, navigazione, . . . ).

Una classificazione ormai datata divideva la meteorologia in tre branche:

- Meteorologia Fisica;
- Meteorologia Sinottica;
- Meteorologia Dinamica.

# Earth system sciences



IPCC, 2001

# Composizione dell'atmosfera

78.0%	$N_2$ (azoto molecolare);
20.9%	$O_2$ (ossigeno molecolare);
0.9%	$Ar$ (argon);
0 – 2%	$H_2O$ ( <b>vapor d'acqua</b> );
$4 \cdot 10^{-2}\% = 400 \text{ ppm}$	$CO_2$ ( <b>anidride carbonica</b> );
$2 \cdot 10^{-3}\% = 20 \text{ ppm}$	$Ne$ (neon);
$5 \cdot 10^{-4}\% = 5 \text{ ppm}$	$He$ (elio);
$2 \cdot 10^{-4}\% = 2 \text{ ppm}$	$CH_4$ ( <b>metano</b> );
$4 \cdot 10^{-5}\% = 0.4 \text{ ppm}$	$N_2O$ ( <b>protossido di azoto</b> );
0 – $0.1 \cdot 10^{-5}\% = 0 - 0.1 \text{ ppm}$	$O_3$ ( <b>ozono</b> ).

A cui si aggiungono tracce di molti altri composti.



## Distribuzione della massa

In prima approssimazione la pressione esercitata dall'atmosfera è calcolabile con l'espressione:

$$p_0 = \frac{M_A g_0}{4\pi R_E^2}$$

dove  $M_A = 5.14 \cdot 10^{18} \text{ kg}$  è la massa totale dell'atmosfera,  $g_0 = 9.8 \text{ m s}^{-2}$  è l'accelerazione di gravità e  $R_E = 6.37 \cdot 10^6 \text{ m}$  è il raggio medio della terra. Si ottiene:

$$p_0 \simeq 10^5 \text{ Pa} = 1000 \text{ hPa} = 1000 \text{ mbar} \simeq 1 \text{ atm.}$$

La variazione verticale della pressione e della densità è molto più grande in verticale rispetto all'orizzontale. In prima approssimazione si possono considerare quantità mediate in orizzontale, descrivendo l'*atmosfera standard*.

La pressione e la densità nell'atmosfera standard seguono sotto i 100 km un profilo verticale logaritmico:

$$p(z) = p(0)e^{-\frac{z}{H}}$$

$$\rho(z) = \rho(0)e^{-\frac{z}{H}}$$

dove  $H \simeq 7 \cdot 10^3 \text{ m}$  è l'altezza di scala

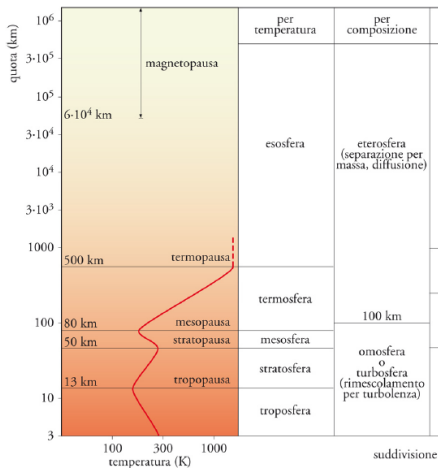
- metà della massa dell'atmosfera si trova sotto i 5500 m;
- il 99% della massa si trova sotto i 30 km di quota.

Due principali meccanismi di diffusione:

- la diffusione molecolare;
- il mescolamento dovuto ai movimenti macroscopici (diffusione turbolenta).

intorno ai 100 km si ha un equilibrio fra i due meccanismi: la turbopausa segna la separazione fra l'*ommosfera* e l'*eterosfera*.

# Profilo verticale



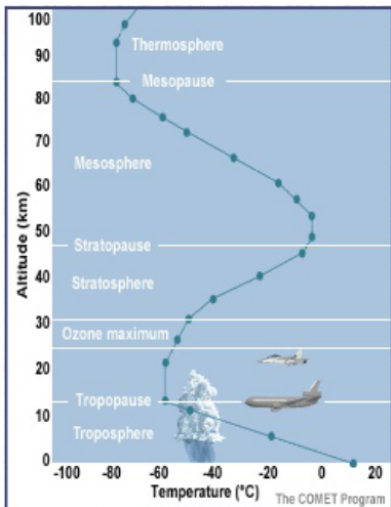
Nell'omosfera il mescolamento determina omogeneità delle concentrazioni.

Nell'eterosfera ogni costituente diminuisce la propria densità come:

$$\rho_i(z) = \rho_i(0)e^{-\frac{z}{H_i}}$$

con  $H_i$  inversamente proporzionale al peso molecolare.

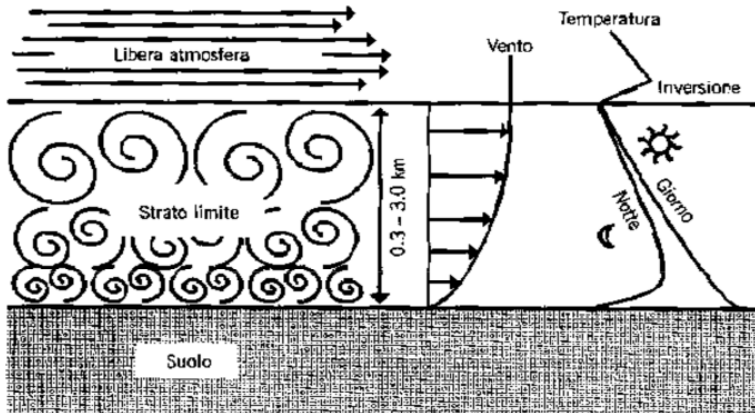
# Troposfera



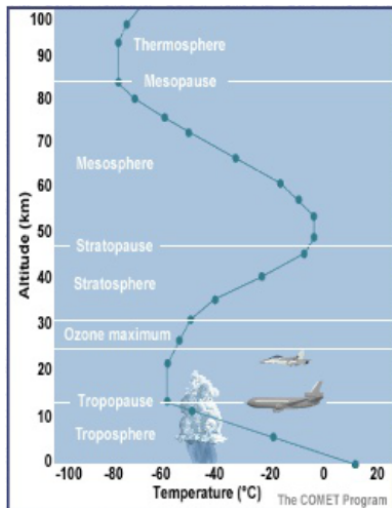
- Spessore  $\simeq 10$  km;
- $\frac{dT}{dz} \simeq 6.5 \text{ } ^\circ\text{C km}^{-1}$
- spesso inversioni termiche
- $\sim 80\%$  massa atmosferica
- quasi tutto il vapore acqueo
- sede dei fenomeni meteorologici
- tempo di residenza basso degli aerosol
- estensione verticale dipende dalla latitudine
- contiene il PBL

# Strato limite planetario

Strato di atmosfera vicino alla superficie che risente dell'influenza esercitata dalla superficie: Attrito, evaporazione/traspirazione, trasferimento di calore, emissione di inquinanti ...

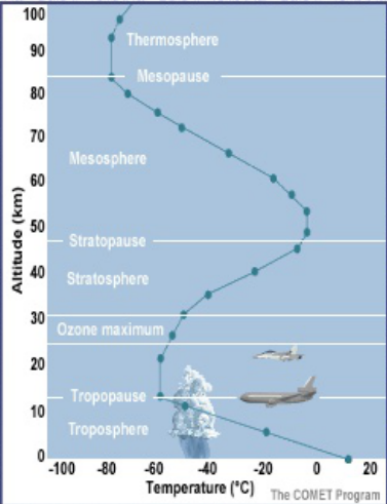


# Stratosfera



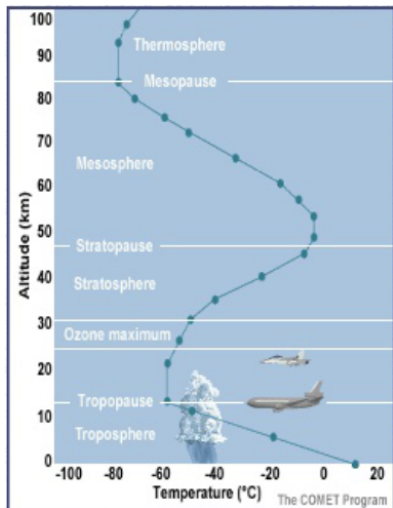
- $T$  costante ( $\sim 10$  km), poi aumenta;
- mescolamento inibito;
- contiene quasi tutto l'ozono ( $O_3$ ), massimo tra 15 – 35 km;
- $O_3$  assorbe radiazione UV, riscaldamento al top:  $\sim 0^\circ C$ ;
- Minimo della temperatura in basso ( $\sim -60^\circ C$ );
- Il 99.9% della massa atmosferica si trova sotto la stratopausa.

# Mesosfera



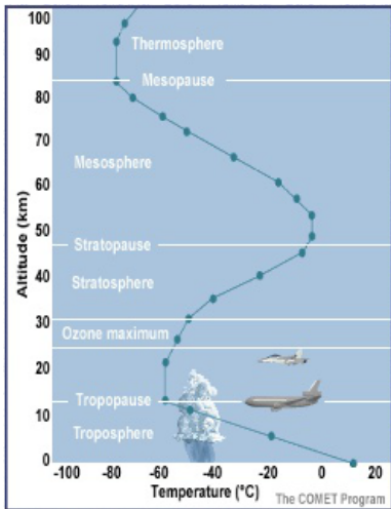
- Temperatura massima alla stratopausa
- $T$  cala con la quota
- Temperatura minima alla mesopausa  $\sim -130^{\circ}\text{C}$
- Favorito il rimescolamento verticale
- Moti convettivi, tracce di vapore
- Alla mesopausa  $T$  aumenta per assorbimento da parte di  $\text{O}_2$  e  $\text{O}_3$

# Termosfera



- Eterosfera
- Si estende per molte centinaia di *km*
- Forti fluttuazioni diurne di  $T$ , legate all'attività solare
- La temperatura aumenta per assorbimento da parte di  $N_2$  e  $O_2$  (fotodissociazione)
- Ionizzazione
- Sopra i 200 *km* ossigeno atomico

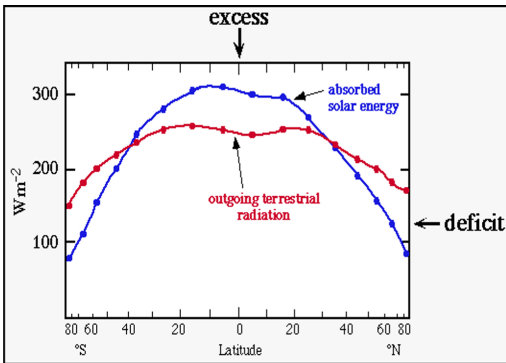
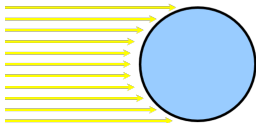




- Riscaldamento in termosfera: ossigeno e azoto assorbono radiazione solare
- Riscaldamento in stratosfera: ozono assorbe radiazione UV
- Riscaldamento in troposfera: la superficie terrestre e gli oceani assorbono la radiazione solare.

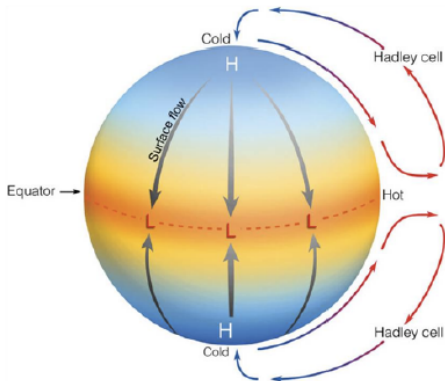
# Il motore della circolazione generale

Il Sole è la fonte di energia che fa muovere l'atmosfera: a grande scala essa si muove per cercare di ridistribuire l'energia che il Sole distribuisce maggiormente su alcune regioni rispetto ad altre.

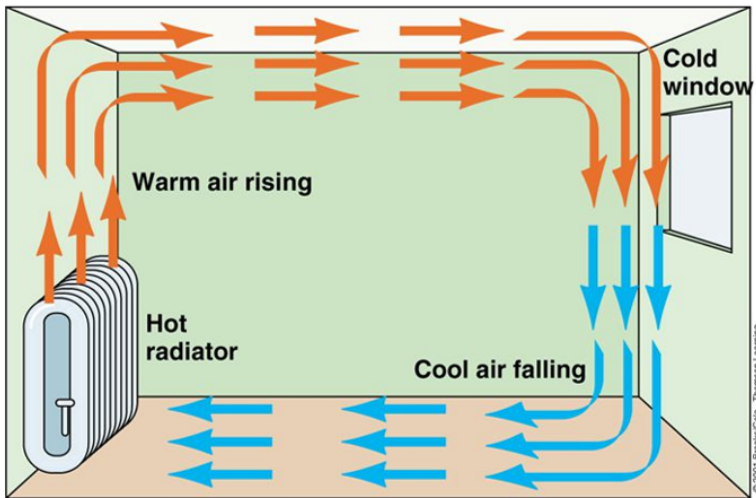


# Circolazione idealizzata a una cella (Hadley, 1735)

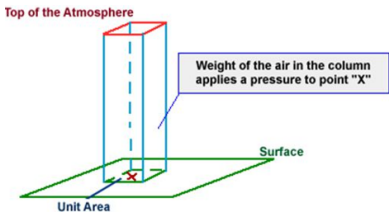
Se la Terra fosse non rotante e con una superficie omogenea (trascurando il diverso riscaldamento di continenti e oceani), il differente riscaldamento darebbe origine ad una singola cella convettiva a scala planetaria, con correnti ascendenti all'equatore e discendenti sui poli.



# Una semplice cella convettiva

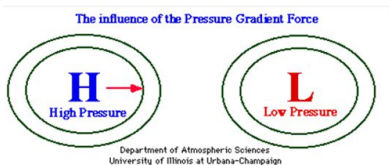


# Gradiente di pressione e vento



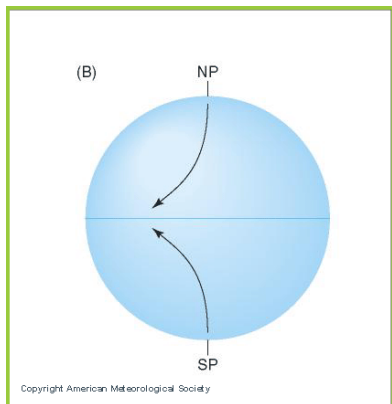
- Bassa pressione: aria calda e umida con minor densità, più leggera e tende a salire

- Alta pressione: aria fredda e secca più densa e pesante, moti discendenti



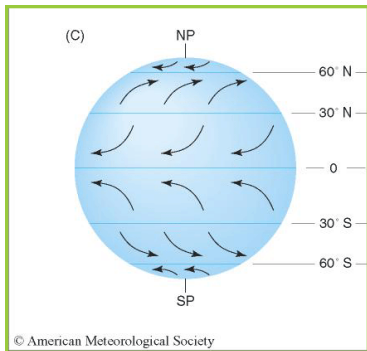
- Al gradiente di pressione è associata una forza che mette in movimento l'aria e genera il vento

# Circolazione idealizzata in un pianeta rotante



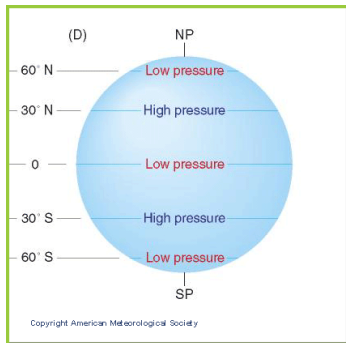
- Introducendo la rotazione (da W a E) entra in gioco la forza di Coriolis
- I venti nell'emisfero N sono deviati verso destra e soffiano verso SW
- I venti nell'emisfero S sono deviati verso sinistra e soffiano verso NW

# Circolazione idealizzata in un pianeta rotante: 3 celle



- Per l'effetto della rotazione si vengono a formare tre fasce ben definite (celle) in ogni emisfero
- Le tre celle sono:
  - $0^{\circ} - 30^{\circ}$  (cella di Hadley)
  - $30^{\circ} - 60^{\circ}$  (cella di Ferrel)
  - $60^{\circ} - 90^{\circ}$  (cella polare)
- Alcuni venti soffiano nello stesso senso della rotazione, altri in senso opposto

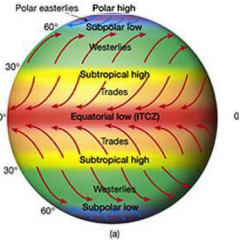
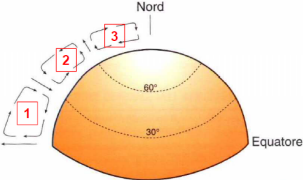
# Circolazione idealizzata in un pianeta rotante: 3 celle



- I venti al suolo convergono all'equatore e attorno ai 60° di latitudine
  - moti ascendenti, raffreddamento per espansione, sviluppo di nubi e precipitazioni
  - zone di convergenza associate a bassa pressione al suolo
- I venti al suolo divergono ai poli e attorno ai 30° di latitudine
  - moti discendenti, compressione e riscaldamento - bel tempo
  - zone di divergenza associate ad alta pressione al suolo



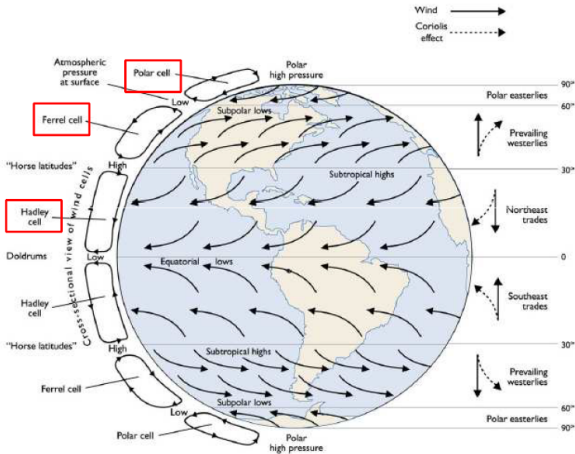
# Circolazione idealizzata in un pianeta rotante: 3 celle



- Cella di Hadley
  - guidata dal gradiente termico meridionale (circolazione termica)
  - l'aria sale all'equatore e scende attorno ai 30°
  - responsabile di deserti, *trade winds* (alisei), ITCZ
- Cella di Ferrel
  - max gradiente di temperatura ma non si instaura circolazione termica
  - l'aria sale attorno ai 60° e scende attorno ai 30°
  - spiega le correnti occidentali (*westerlies*) alle medie latitudini
- Cella polare
  - debole circolazione termica

# Circolazione generale idealizzata

## *The atmospheric circulation*



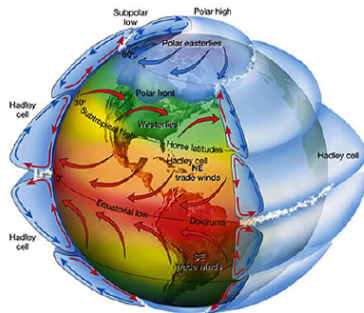
(a) GLOBAL WIND PATTERN

(Pinet)

# Circolazione generale: caratteristiche principali

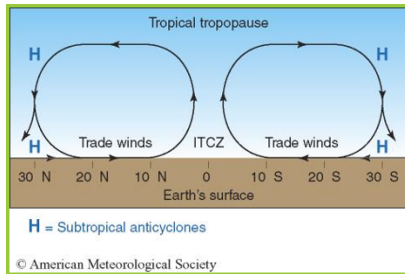
Il modello a 3 celle è in grado di spiegare diverse caratteristiche della circolazione generale osservata:

- ITCZ e bassa pressione all'equatore
- anticicloni sub-tropicali
- basse pressioni tra 30° – 60°
- il generale andamento dei venti: *westerlies* alle medie latitudini, alisei orientali persistenti all'equatore, venti orientali ai poli



# Cella di Hadley e Inter-tropical convergence zone (ITCZ)

- L'ITCZ è la zona dove convergono gli alisei dei due emisferi, (l'equatore per una Terra ideale, in realtà la posizione dell'ITCZ oscilla stagionalmente)
- In corrispondenza dell'ITCZ si generano forti moti verticali, responsabili della forte piovosità della fascia tropicale interessata
- La discesa attorno ai 30° (subsidenza) genera riscaldamento ed essiccamento (deserti)

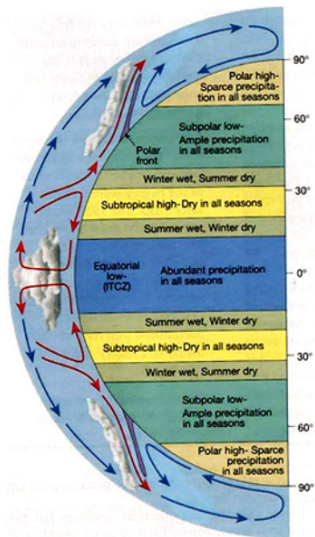


# Posizione effettiva dell'ITCZ e stagionalità



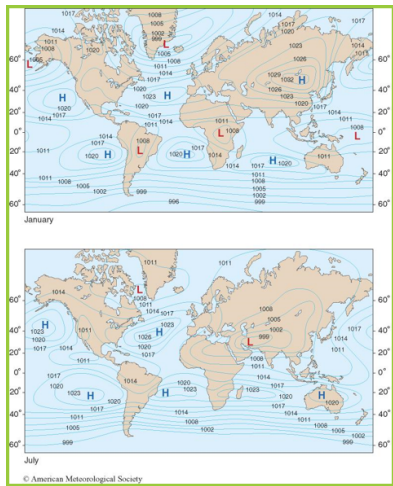
Lo spostamento stagionale dell'ITCZ condiziona il clima nelle aree interessate:

- Zone equatoriali: condizioni costanti in tutto l'anno, abbondante piovosità
- Zone tropicali: stagione umida e stagione secca (monsoni)
- Zone subtropicali: sempre secco e arido (deserti)



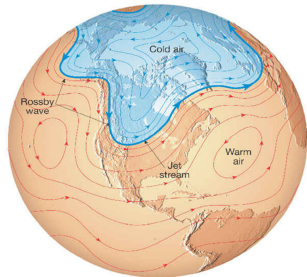
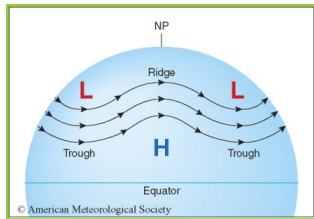
# Circolazione generale: caratteristiche principali

- La presenza dei continenti che si scaldano/raffreddano rapidamente, delle montagne, dei ghiacci, altera la circolazione generale teorica del modello a 3 celle, specie nell'emisfero N
- Contrasti termici (e quindi di pressione) tra mare e terre emerse: formazione di aree di bassa e alta pressione semipermanenti
- Pressione media a livello del mare a gennaio (sopra) e a luglio (sotto)



# La circolazione effettiva osservata

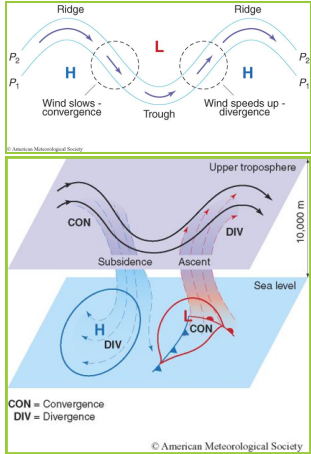
- La circolazione descritta dalla cella di Hadley è rappresentativa della circolazione reale ai tropici. La cella di Ferrel e la cella polare in pratica non esistono o sono molto deboli
- Alle medie latitudini i venti in quota sono mediamente occidentali con un pattern a onde (promontori e saccature) e determinano il movimento dei sistemi meteorologici a scala sinottica
- Ondulazioni a scala planetaria: onde di Rossby





# Promontori e saccature: divergenza e convergenza

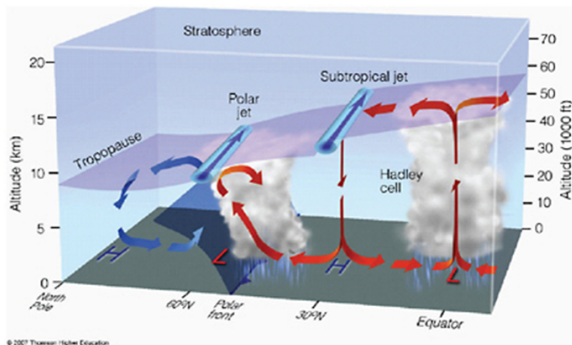
- Le correnti occidentali in quota accelerano nei promontori e rallentano nelle saccature: divergenza davanti ai promontori e convergenza davanti alle saccature
- Al suolo accade l'opposto e si formano zone di alta e bassa pressione con moti discendenti (alta) o ascendenti (bassa)



# Sezione verticale dei venti prevalenti in troposfera

L'altezza della tropopausa è strettamente legata alla temperatura media dell'aria in troposfera (eq. ipsometrica, vedi lezione sulla termodinamica).

Si possono distinguere a grandi linee tre zone con altezza minore ai poli e maggiore ai tropici.



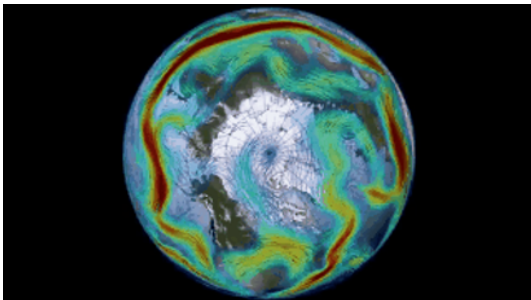
# Le correnti a getto

- Corridoi relativamente stretti (centinaia di km) con venti molto forti in alta quota (7-12 km)
- Mediamente venti dell'ordine di 150 km/h ma possono arrivare a 350 km/h
- Molto importanti per il traffico aereo



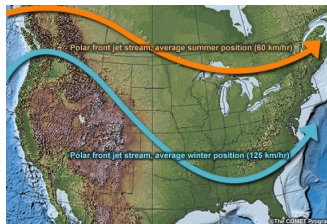
# Le correnti a getto

- Il fronte polare separa masse d'aria fredda delle alte latitudini da masse d'aria calda tropicali
- Gradiente di pressione che aumenta con la quota a causa del gradiente termico polo-equatore (vento termico, vedi lezione sulla dinamica)
- Venti più forti nei pressi della tropopausa



# Le correnti a getto

- Fondamentali per l'evoluzione del tempo meteorologico alle medie latitudini
- Variazioni stagionali in intensità e posizione (in inverno più intense e più a sud)
- Corrente a getto subtropicale al bordo settentrionale della cella di Hadley
  - meno variabile in latitudine di quella polare
  - più intensa in inverno

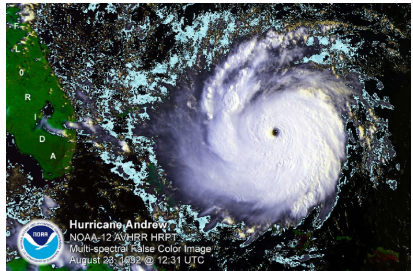
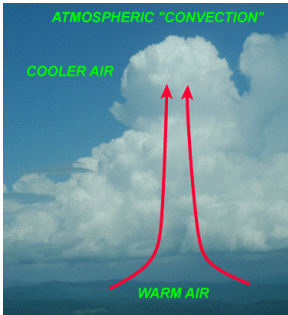






# Instabilità convettiva

La convezione limita il gradiente verticale di temperatura: converte il vapore in acqua, liberando calore latente di condensazione.

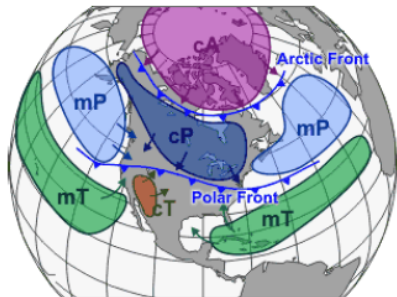




# Masse d'aria e fronti

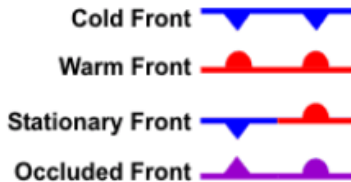
Una massa d'aria è una vasta porzione di atmosfera (migliaia di *km*) in cui temperatura e umidità sono relativamente costanti

- polare marittima (mP):  
fredda e umida
- polare continentale (cP) e  
artica continentale (cA):  
molto fredda e secca
- tropicale marittima (mT):  
calda e umida
- tropicale continentale (cT):  
molto calda e secca



I fronti sono zone di transizione tra masse d'aria con caratteristiche diverse (temperatura e umidità) e sono classificati in base a quale massa d'aria sostituisce l'altra:

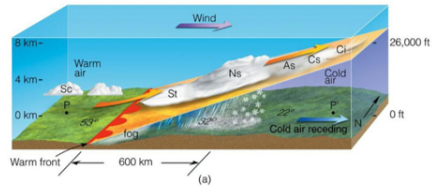
- fronte freddo
- fronte caldo
- fronte stazionario
- fronte occluso



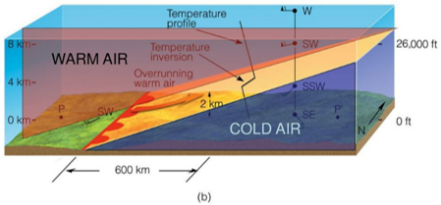
# Fronte caldo

Aria più calda e leggera avanza e scorre sopra aria fredda preesistente: struttura inclinata con pendenza moderata (fino a 1:300).

- Sviluppo di nubi stratiformi su un'ampia area con precipitazioni lungo il fronte e a nord di esso (pioggia, neve o pioggia che gela in inverno)
- Variazioni di temperatura, vento e umidità al passaggio del fronte



© 2007 Thomson Higher Education

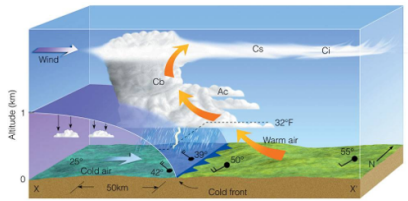
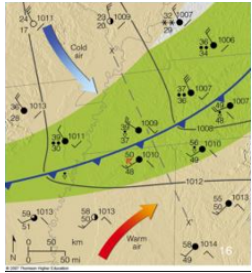


© 2007 Thomson Higher Education

# Fronte freddo

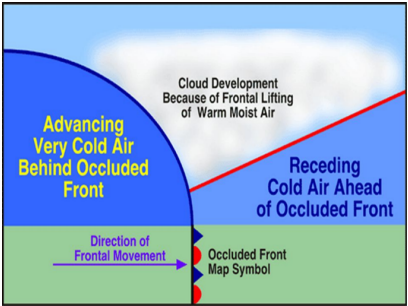
Aria fredda avanza rapidamente e costringe l'aria calda a salire bruscamente: struttura inclinata con forte pendenza.

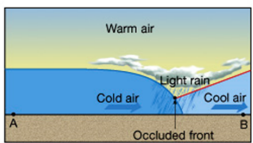
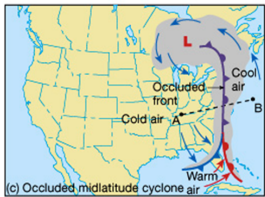
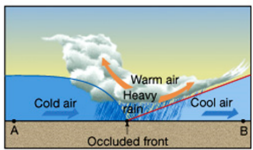
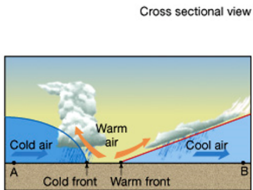
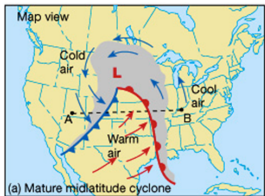
- Sviluppo di precipitazioni convettive spesso organizzate in linee
- Gradienti più intensi rispetto a un fronte caldo e brusche variazioni di temperatura, vento e umidità
- Dopo il passaggio del fronte aria più fredda e secca favorisce un rasserenamento



# Fronte occluso

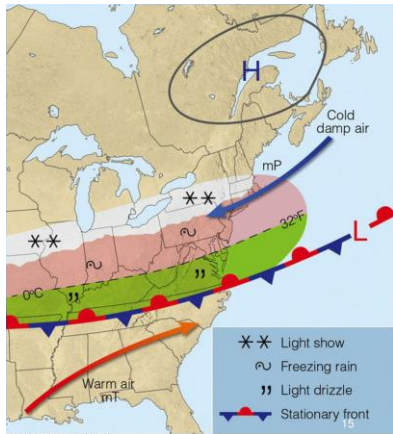
- Il fronte freddo avanza più rapidamente e raggiunge il fronte caldo che tende a sollevarsi
- Intensificazione delle precipitazioni e dei venti al suolo
- Le masse d'aria iniziano a mescolarsi e i gradienti progressivamente si attenuano





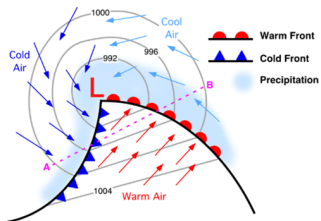
# Fronte stazionario

- Struttura frontale statica o con movimento molto lento
- Vento parallelo al fronte
- Possibili precipitazioni persistenti
- In assenza di movimento le masse d'aria tendono a mescolarsi progressivamente e il fronte si dissipa



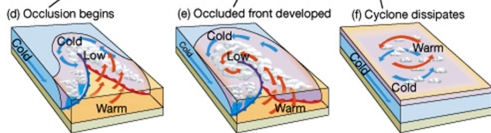
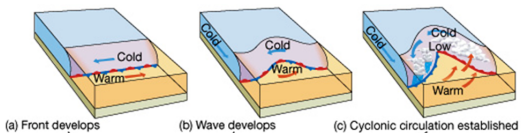
# Cicloni delle medie latitudini

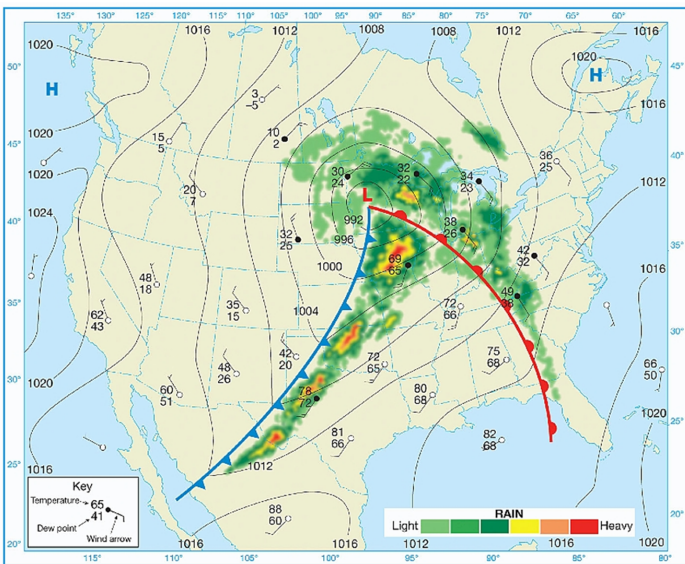
- Circolazione di bassa pressione attorno a un minimo (antioraria in emisfero N)
- Sistemi meteorologici di larga scala trasportati dalle correnti occidentali per grandi distanze e associati a precipitazioni su vaste aree
- Tempo caratteristico dell'ordine della settimana
- Fondamentali per il trasporto globale di calore e per il bilancio termico terrestre
- Studiati per la prima volta dalla scuola norvegese tra fine '800 e inizio '900 (teoria del fronte polare)



Vilhelm Bjerknes  
(1862-1951)



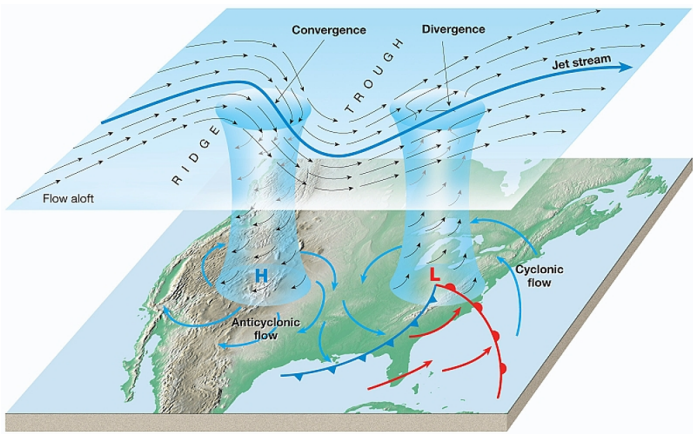




Copyright © 2010 Pearson Prentice Hall, Inc.

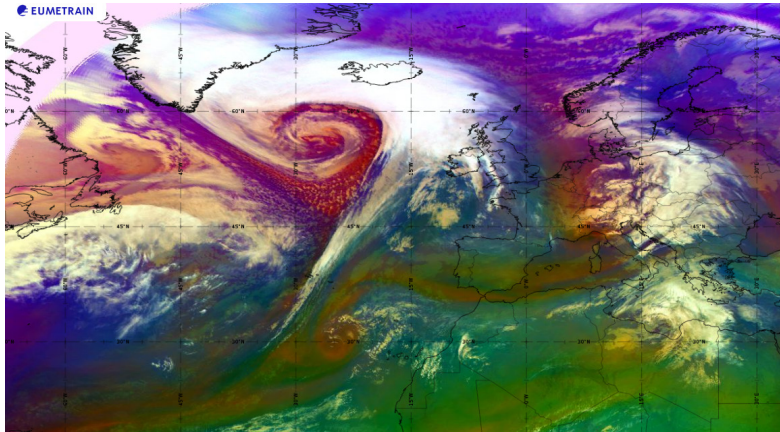
# Ciclogenesi e flusso in quota

- Secondo la teoria del fronte polare la ciclogenesi avviene quando una superficie frontale è deformata in una discontinuità a forma di onda
- L'onda può formarsi per forzanti superficiali come orografia, contrasti di temperatura, correnti oceaniche
- Ruolo fondamentale del flusso in quota per lo sviluppo e l'evoluzione di cicloni e anticicloni
- Relazioni tra flusso in quota e ciclogenesi formalizzate da Carl Rossby negli anni '40
- I cicloni delle medie latitudini nascono da ondulazioni su larga scala (onde di Rossby) che crescono per l'instabilità baroclina associata al gradiente meridionale di temperatura



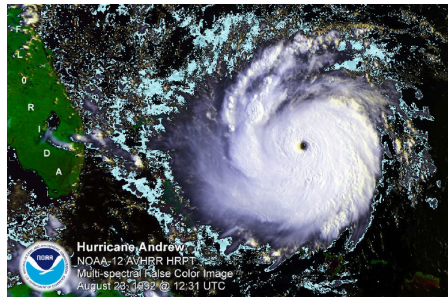
Copyright © 2010 Pearson Prentice Hall, Inc.

# Il ciclone extratropicale Dennis, febbraio 2020



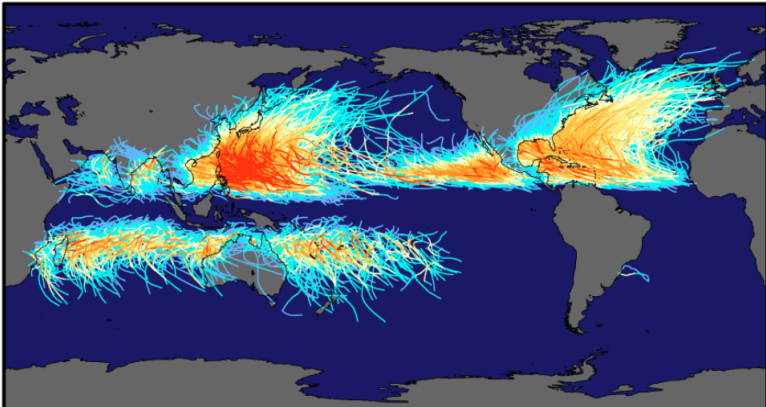
# Cicloni tropicali

- Si formano sul mare nelle zone tropicali ( $SST > 27^{\circ}C$ )
- Flussi di calore e umidità e rilascio di calore latente
- Debole *wind shear* verticale
- Caratteristico occhio con cielo sereno e calma di vento
- Venti forti e convezione attorno al minimo
- Cuore caldo



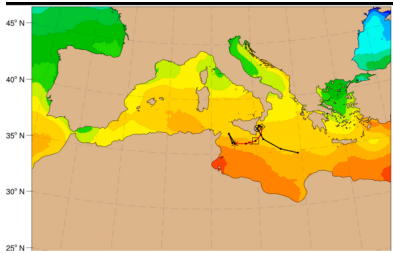
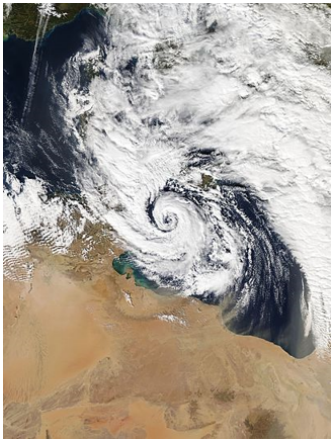


# Tracks and Intensity of All Tropical Storms



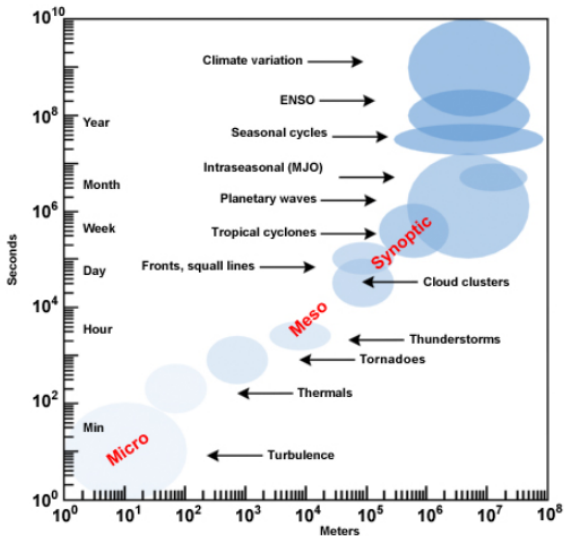


# Tropical-like cyclones - TLC



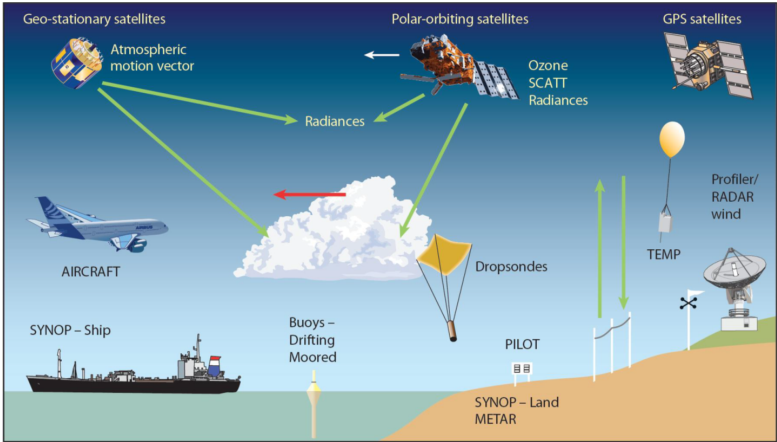
TLC Qendresa, novembre 2014

# Scala dei fenomeni atmosferici



©The COMET Program

# Sistemi di osservazione in atmosfera



# Modelli meteorologici

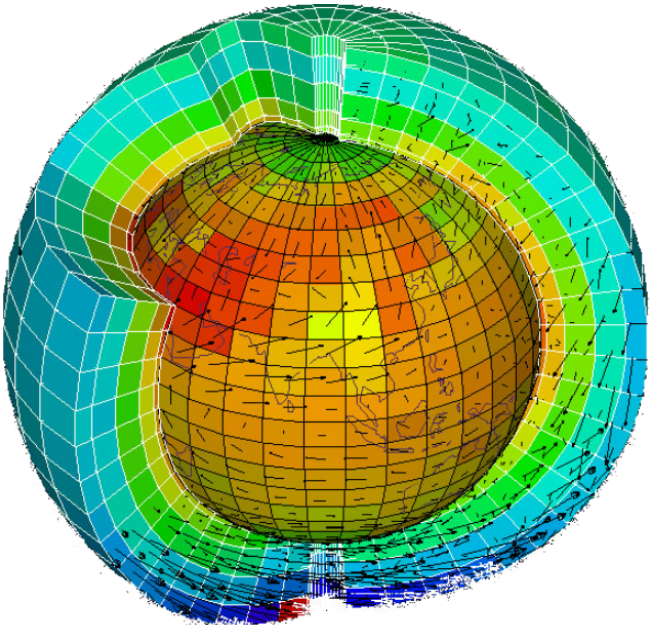
$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\alpha\nabla p - \nabla\Phi - 2\boldsymbol{\Omega} \wedge \mathbf{v} + \mathbf{F} \quad \text{Eq. moto}$$

$$\dot{q} = C_p \frac{dT}{dt} - \alpha \frac{dp}{dt} \quad \text{Primo principio}$$

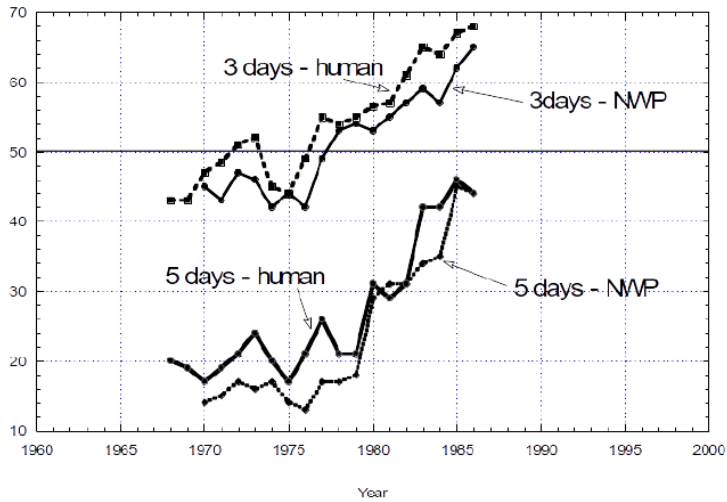
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla(\rho\mathbf{v}) \quad \text{Eq. continuità}$$

$$p\alpha = RT \quad \text{Eq. gas}$$

$$\frac{d}{dt}m_w = E - C \quad \text{Conservazione } H_2O$$

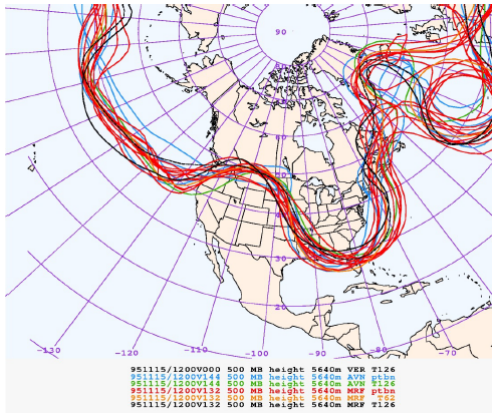


### NMC/NCEP days 3 and 5 NWP and human forecasts MSLP standardized anomaly correlations (F. Hughes)



## Caos deterministico

Quando il presente determina il futuro ma una conoscenza approssimata del presente non determina approssimativamente il futuro.







## Per approfondire:

- Wallace J.M. and P.V. Hobbs (2006). Atmospheric science: an introductory survey (2nd edition). International Geophysics Series 92, Associated press, 484 pp.
- Kalnay E. (2003). Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability. Cambridge University Press. 341 pp.
- Stull, Rolald B. (1988). An Introduction to Boundary Layer Meteorology. Kluwer Academic Publishers. 441 pp.