

www.ufficiometeo.it



CORSO DI METEOROLOGIA GENERALE E AERONAUTICA

5 - Il Vento

DEFINIZIONE - ORIGINE - FORZE FONDAMENTALI
VENTO IN QUOTA E VENTO AL SUOLO
EQUAZIONE GENERALE DEL VENTO
RAPPRESENTAZIONE METEOROLOGICA DEL VENTO
ANALISI DI VENTI PARTICOLARI

Dr. Marco Tadini
meteorologo

U.M.A. Home Page - Ufficio Meteorologico Aeroportuale
www.ufficiometeo.it

IL VENTO

■ DEFINIZIONE

- spostamento orizzontale di masse d'aria

■ ORIGINE

- variazioni di temperatura
- dislivello barico tra due regioni
- rotazione terrestre (*sistema non inerziale*)

FORZE CHE AGISCONO SUI MOVIMENTI

ORIZZONTALI DELL'ARIA

FORZA DI GRADIENTE

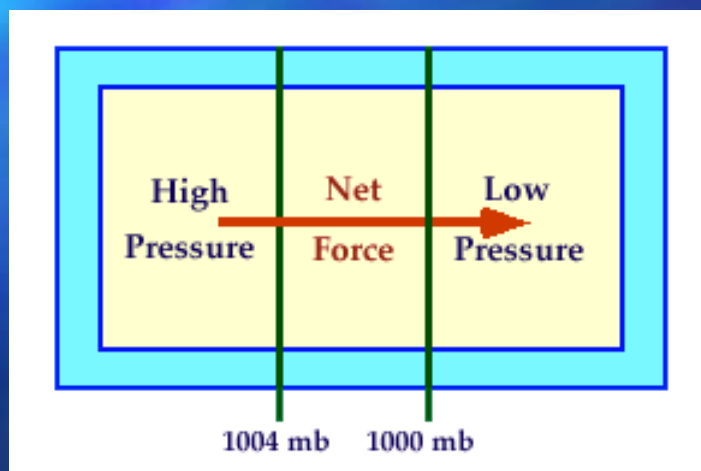
FORZA DEVIANTE

FORZA CENTRIFUGA

FORZA DI ATTRITO

FORZA DI GRADIENTE

- origina il movimento delle masse d'aria
- moto dalle regioni di H a quelle di L pressione
- moto perpendicolarmente alle isobare
- forza proporzionale al dislivello barico



FORZA DI GRADIENTE

- cilindretto aria avente:
 - base unitaria $S = 1\text{cm}^2$
 - altezza h
- posto tra due superfici isobariche p e $p + \Delta p$
- sulle basi agiscono due forze F_{sup} ed F_{inf}
 $F_{\text{sup}} = P \cdot S = p \cdot 1\text{cm}^2$
 $F_{\text{inf}} = P \cdot S = (p + \Delta p) \cdot 1\text{cm}^2$
- risultante delle forze laterali è nulla ($R=0$)
- risultante delle forze agenti sulle basi è:
 $\Delta F = [(p + \Delta p) \cdot 1\text{cm}^2] - (p \cdot 1\text{cm}^2)$
 $\Delta F = \Delta p \cdot 1\text{cm}^2$

FORZA DI GRADIENTE

- volume del cilindretto
 $\Delta V = S \cdot h = 1\text{cm}^2 \cdot \Delta x$
- forza per unità di volume
 $\Delta F/\Delta V = \Delta p/\Delta x$ **gradiente barico orizzontale**
- massa d'aria contenuta nel cilindretto
 $\Delta m = \Delta V \cdot \rho = 1\text{cm}^2 \cdot \Delta x \cdot \rho$
- forza agente *sull'unità di massa d'aria*
 $\Delta F/\Delta m = (\Delta p \cdot 1\text{cm}^2)/(1\text{cm}^2 \cdot \Delta x \cdot \rho)$
 $\Delta F/\Delta m = (1/\rho) \cdot (\Delta p/\Delta x) = G$
G = forza di gradiente

FORZA DEVIANTE

TEOREMA DI CORIOLIS

- l'accelerazione assoluta di un punto materiale P in moto rispetto ad un sistema di riferimento mobile (*terna mobile*), che a sua volta si muove rispetto ad un sistema di riferimento inerziale fisso (*terna fissa*) è la somma di tre accelerazioni:
 - **ac. relativa a_r**
 - dovuta al moto di P rispetto alla terna mobile
 - **ac. di trascinamento a_t**
 - dovuta al moto della terna mobile rispetto alla terna fissa
 - **ac. complementare o di Coriolis a_c**

FORZA DEVIANTE

ACCELERAZIONE DI CORIOLIS

$$a_c = 2 \Omega v \sin \varphi = f v$$

($f = 2 \Omega \sin \varphi$ *parametro di Coriolis*)

dove:

- Ω = velocità angolare rotazione terrestre
 - $\Omega = 729 \cdot 10^{-7}$ rad/s
- v = velocità del vento
- φ = latitudine geografica
 - equatore: $\sin \varphi = 0 \Rightarrow a_c = 0$
 - poli: $\sin \varphi = 1 \Rightarrow a_c = 2 \Omega v$

FORZA DEVIANTE

FORZA DEVIANTE o DI CORIOLIS

$$D_{(\text{unità di massa})} = a_c = 2 \Omega v \sin \varphi$$

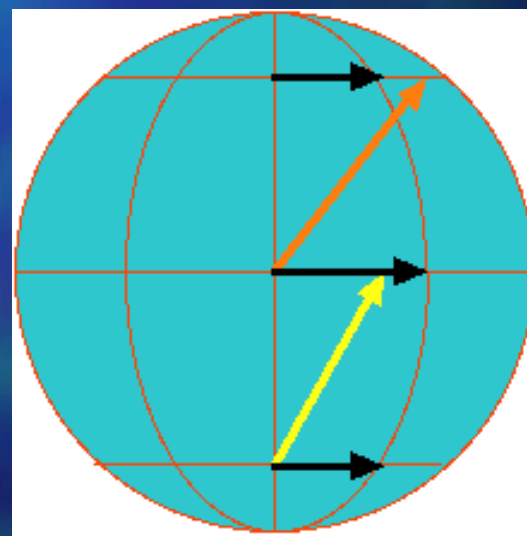
- ogni oggetto in moto sulla superficie Terra subisce una deviazione:
 - 90° verso destra nell'emisfero boreale
 - 90° verso sinistra nell'emisfero australe
- teoria di George Hadley (1685-1768)
 - caso delle molecole di aria (teoria su origine alisei)
 - basata sul principio di conservazione della velocità
 - intuitivamente buona per il primo XVIII secolo:
 - Hadley comprese importanza rotazione Terra
 - spiega abbastanza bene i movimenti nord-sud
 - **matematicamente insufficiente**
 - in anticipo su Coriolis (1792-1843)

FORZA DEVIANTE: TEORIA DI HADLEY

- Terra ruota verso est con velocità angolare Ω
- due punti a due differenti latitudini:
 - hanno diversa distanza r_1 e r_2 da asse rotazione
 - sono in moto circolare uniforme con:
 - uguale periodo T , pari al periodo rotazione Terra
 - uguale velocità angolare, pari alla vel.angolare Terra
 - diverse velocità lineari

FORZA DEVIANTE: TEORIA DI HADLEY

- se un corpo si trova all'equatore:
 - ha traiettoria circolare con $R=R_{Terra}$
 - possiede velocità lineare $v_{eq} = 2\pi R/T$
- se il corpo si muove dall'equatore verso N:
 - conserva la propria velocità lineare
 - ha velocità maggiore rispetto corpi altre latitudini
 - \Rightarrow rispetto al suolo appare spinto verso E da una forza misteriosa
 - non esiste alcuna forza: Terra si muove a velocità inferiore al corpo



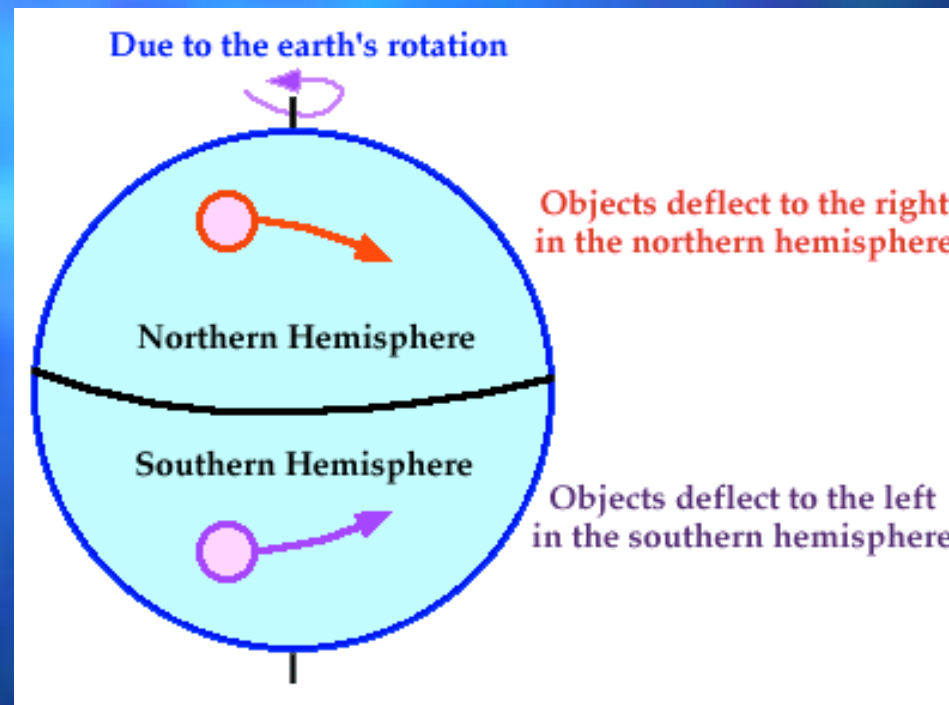
FORZA DEVIANTE: TEORIA DI HADLEY

CONCLUSIONE (Emisfero Nord)

un corpo in movimento viene deviato verso destra
rispetto ad un osservatore al suolo

- la deviazione dipende dalla differenza tra le velocità del corpo e del suolo
- la deviazione diviene significativa:
 - alte velocità
 - lunghe distanze (specialmente nord-sud)

EFFETTI DELLA FORZA DEVIANTE



EFFETTI DELLA FORZA DEVIANTE

FORZA DEVIANTE o DI CORIOLIS

$$D_{(\text{unità di massa})} = a_c = f v = 2 \Omega v \sin \varphi$$

- per la dipendenza da latitudine e velocità:
 - a parità di latitudine:
 - venti deboli: deviazione minore
 - venti intensi: deviazione maggiore
 - a parità di velocità:
 - venti equatoriali: deviazione minore
 - venti polari: deviazione maggiore

FORZA CENTRIFUGA

- masse d'aria su traiettoria curvilinea
- soggette ad una forza centrifuga avente:
 - direzione normale alla traiettoria
 - verso esterno alla curvatura

$$C_{(\text{unità di massa})} = v^2 / r$$

v = velocità del vento

r = raggio di curvatura traiettoria

FORZA D'ATTRITO

- azione dell'ambiente sui bassi strati atmosfera
- la forza di attrito:
 - varia con la natura e la configurazione terreno
 - più intensa su terreno accidentato, meno sul mare
 - diminuisce con la quota (nulla a 1000 metri circa)
- il vettore della forza ha:
 - verso opposto al movimento
 - intensità proporzionale al movimento

$$A_{(\text{unità di massa})} = K v$$

K = coefficiente d'attrito

COMPOSIZIONE DELLE FORZE

VENTO IN QUOTA o GEOSTROFICO

vento geostrofico

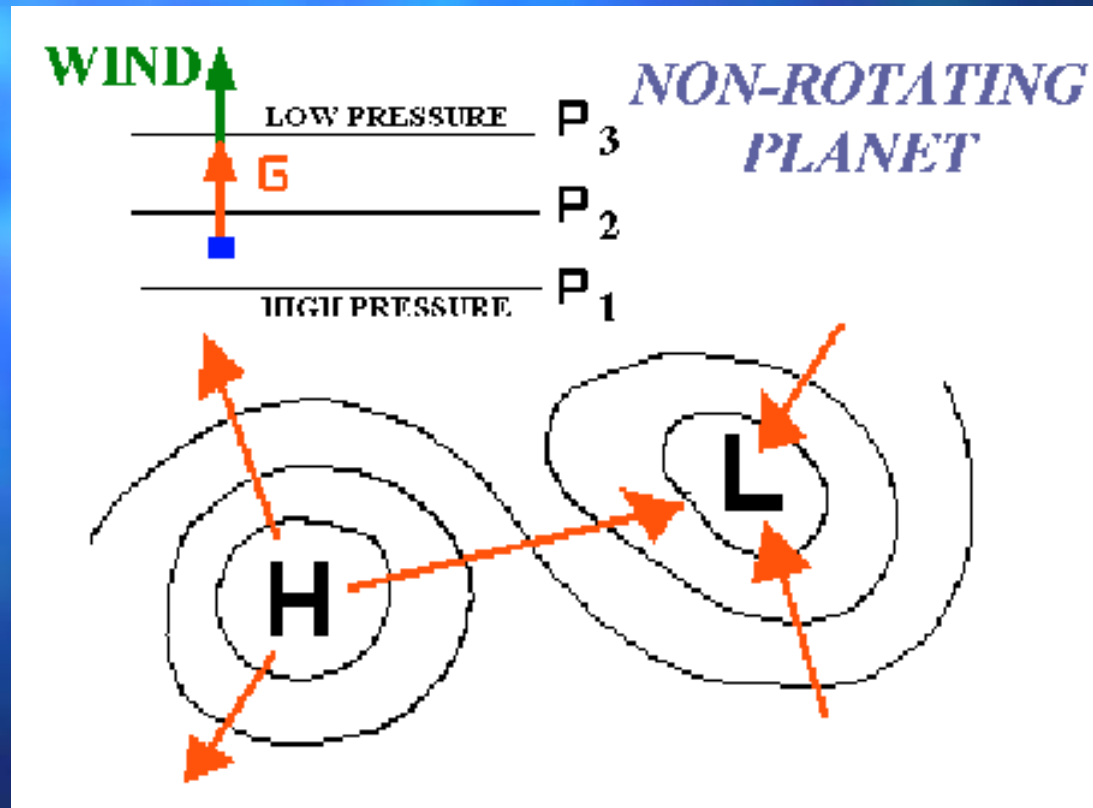
vento ciclostrofico

VENTO AL SUOLO

VENTO DI GRADIENTE

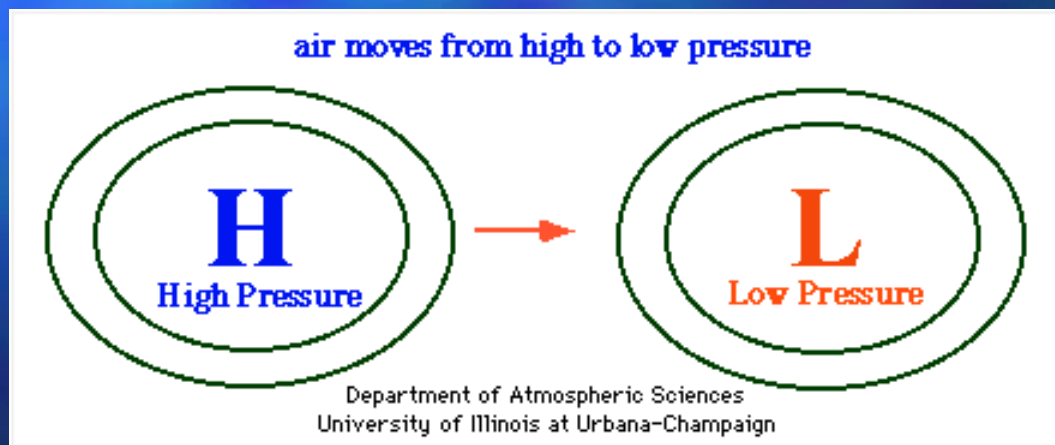
- caso ipotetico: Terra non in rotazione
 - non esiste componente di Coriolis
 - il vento è un vento di gradiente “puro”
 - direzione perpendicolare a isobare
 - da alte verso basse pressioni

VENTO DI GRADIENTE



VENTO GEOSTROFICO

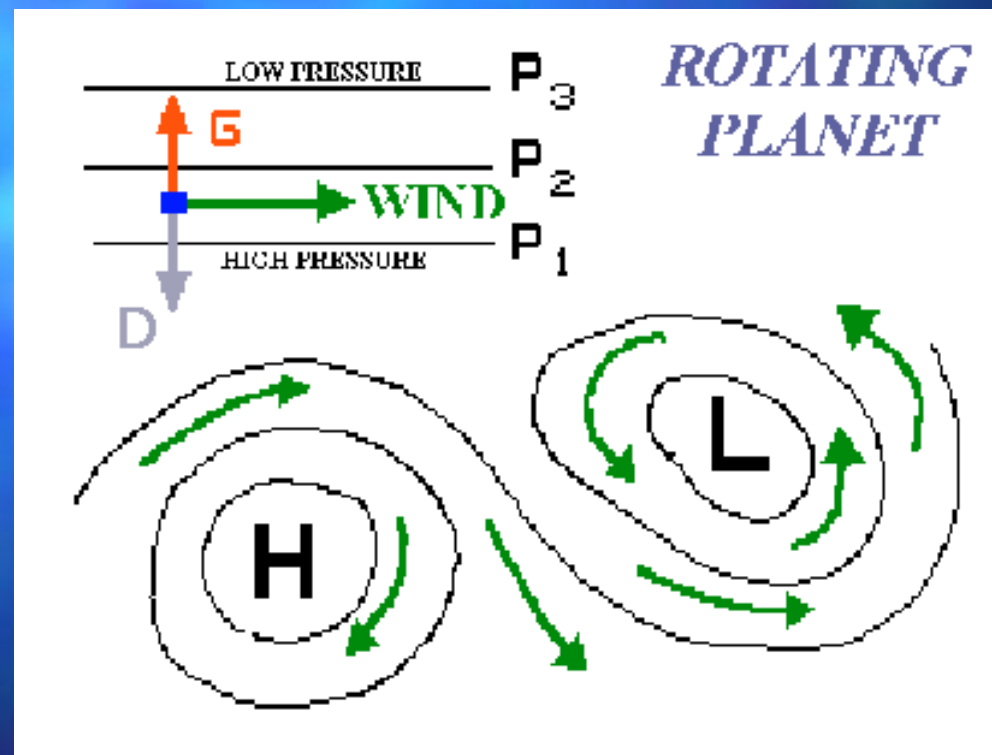
- vento in quota: assenza di attrito ($A=0$)
- particella di aria inizialmente a riposo:
 - inizia a muoversi per effetto forza di gradiente G
(vento di gradiente)
 - moto da H verso L perpendicolare alle isobare



VENTO GEOSTROFICO

- non appena velocità del vento $v \neq 0$:
 - particella risente forza deviante di Coriolis D
- la deviazione di Coriolis:
 - aumenta con velocità vento
 - produce una rotazione verso destra
- quando D uguaglia G:
 - il vento ha direzione parallela alle isobare
 - la deviazione di Coriolis non ha più effetto
 - altrimenti vento spirerebbe contrario a G (*impossibile*)

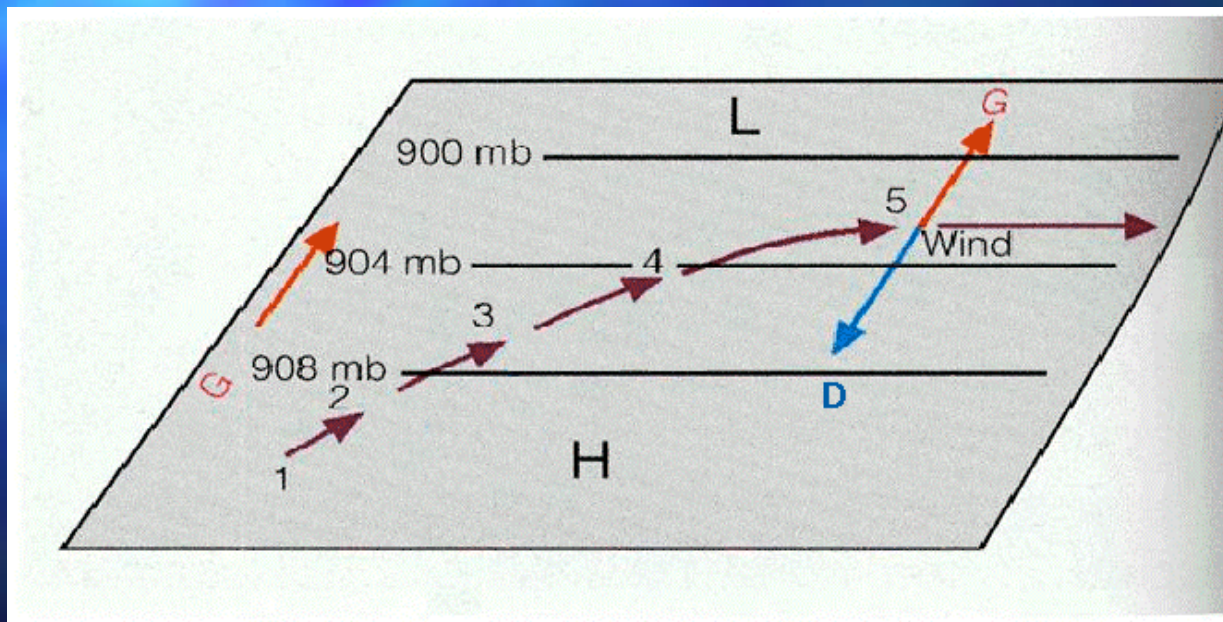
VENTO GEOSTROFICO



VENTO GEOSTROFICO

EQUAZIONE DEL VENTO GEOSTROFICO

$$\underline{G} + \underline{D} = \underline{0} \Rightarrow G = D$$



VENTO GEOSTROFICO

EQUAZIONE DELLA VELOCITA'

DEL VENTO GEOSTROFICO

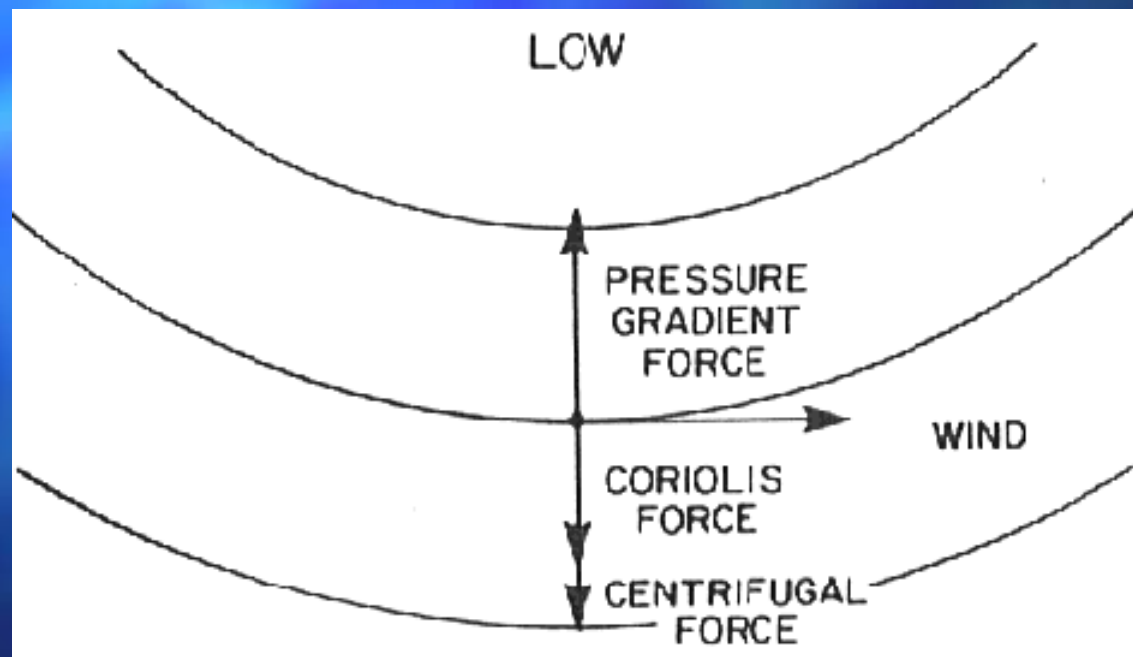
$$v = (1/\rho) \cdot (\Delta p/\Delta x) / 2 \Omega \sin \varphi$$

$$v = (1/f \rho) \cdot (\Delta p/\Delta x)$$

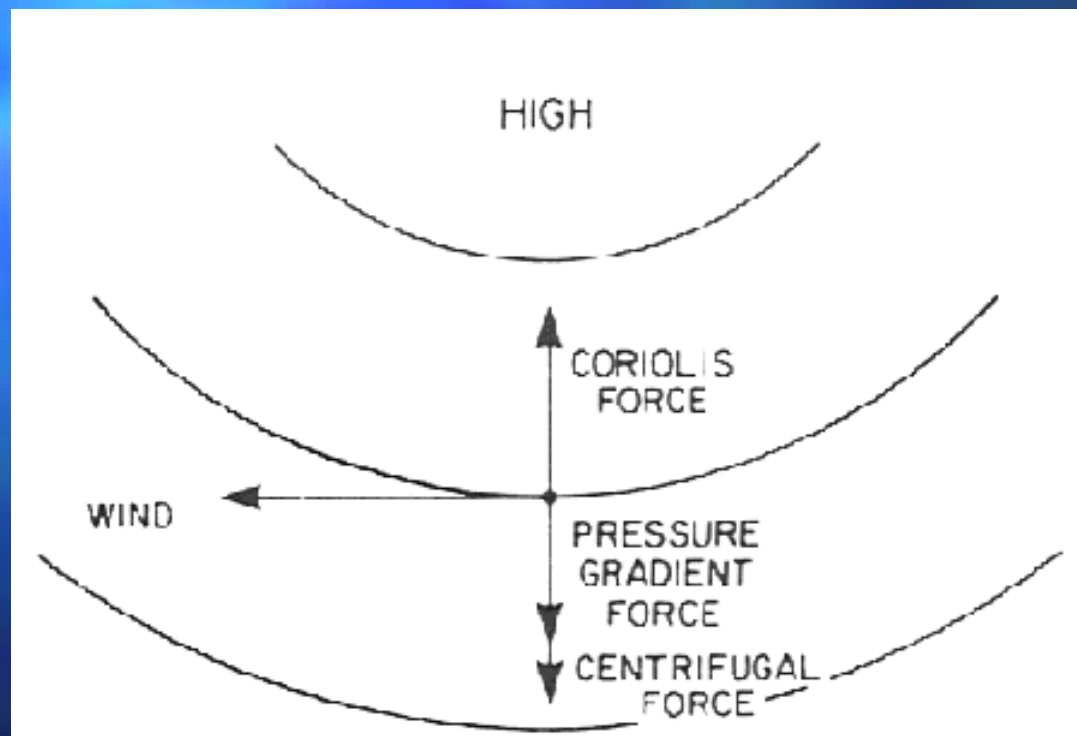
VENTO GEOSTROFICO CICLOSTROFICO

- caso di isobare curvilinee ($C \neq 0$)
- equilibrio tra G , D e C :
- se circolazione **ciclonica**:
 - G ha direzione interna L ; C esterna
 - D equilibra la differenza tra G e C : $D = G - C$
- se circolazione **anticiclonica**:
 - G ed C hanno entrambe direzione esterna H
 - D equilibra la somma tra G e C : $D = G + C$

VENTO GEOSTROFICO CICLOSTROFICO CIRCOLAZIONE CICLONICA



VENTO GEOSTROFICO CICLOSTROFICO CIRCOLAZIONE ANTICICLONICA



VENTO GEOSTROFICO CICLOSTROFICO

EQUAZIONE VENTO

GEOSTROFICO CICLOSTROFICO

$$\underline{G} + \underline{D} + \underline{C} = \underline{0} \Rightarrow D = G \pm C$$

caso " + " : circolazione anticiclonica

caso " - " : circolazione ciclonica

Componente ciclostrofica significativa in caso di:



- alte velocità
- isobare di corto raggio

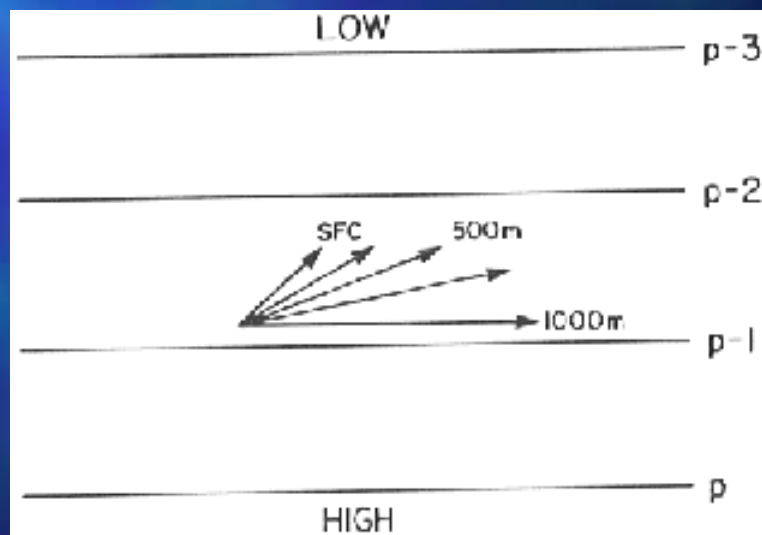
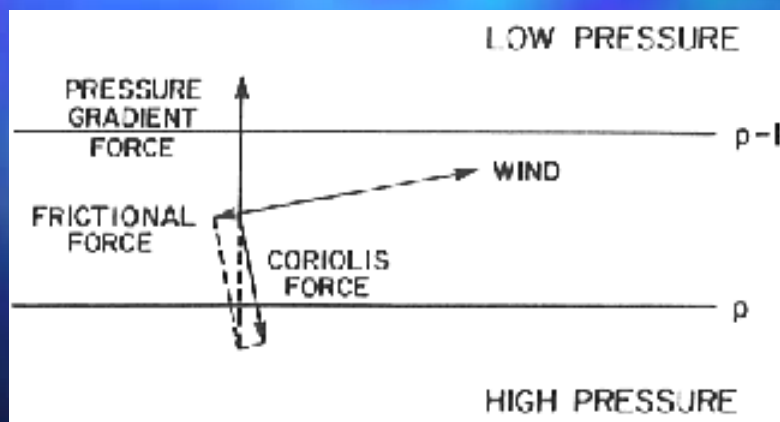
In conclusione, il vento geostrofico:

- è un vento teorico che:
 - approssima bene il vento reale in quota
 - ha velocità costante (*vento stazionario*)
- si muove parallelamente alle isobare lasciando:
 - nell'emisfero nord:
basse pressioni a sinistra - alte pressioni a destra
 - nell'emisfero sud:
contrario

⇒ **REGOLA DI BUYS BALLOT
PER IL VENTO GEOSTROFICO**

VENTO AL SUOLO

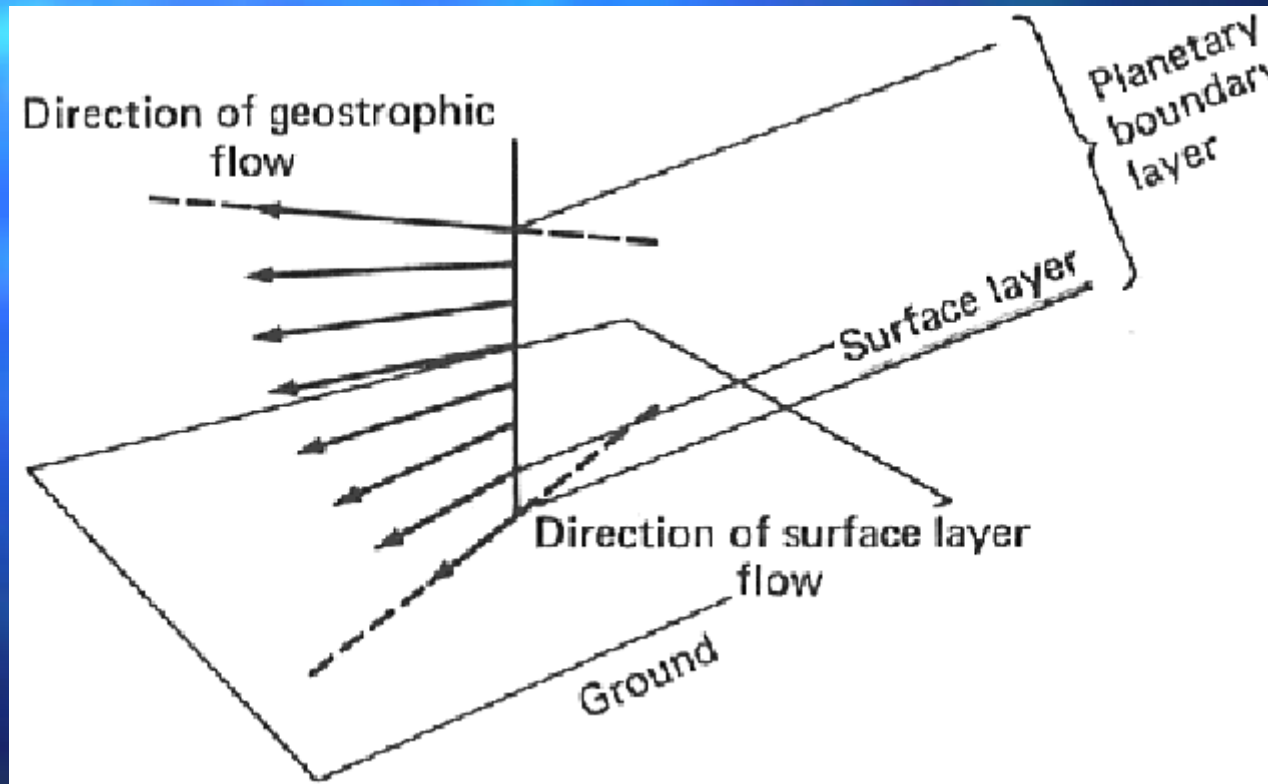
- Forza dovuta all'attrito:
 - rallenta la velocità
 - devia il vento geostrofico verso basse pressioni
 - nulla oltre quota di 1000 metri



VENTO AL SUOLO

- sugli oceani:
 - velocità $\approx 70\%$ velocità vento geostrofico
 - deviazione di 10° - 20° direzione vento geostrofico
- sui continenti:
 - velocità $\approx 40\%$ velocità vento geostrofico
 - deviazione di 40° - 50° direzione vento geostrofico
- a quota di 1000 metri:
 - attrito nullo
 - vento geostrofico

VENTO AL SUOLO

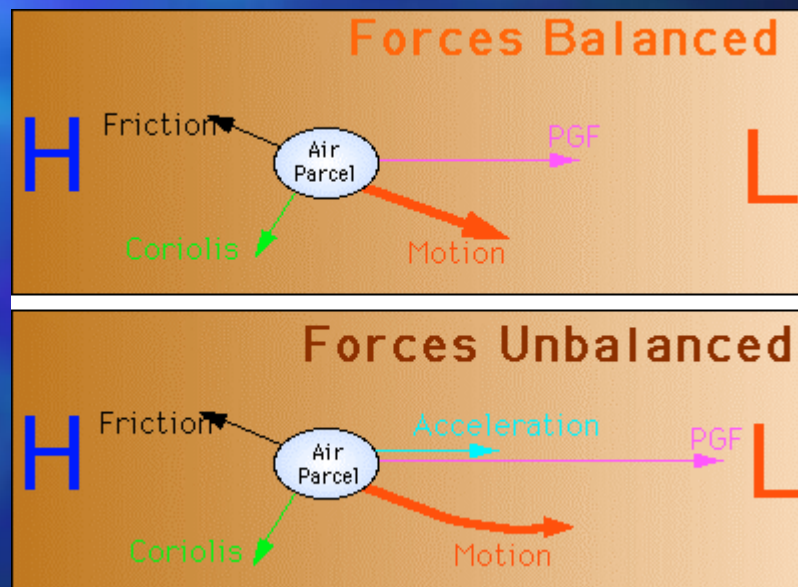


VENTO AL SUOLO

$$\underline{R} = \underline{G} + \underline{D} + \underline{C} + \underline{A}$$

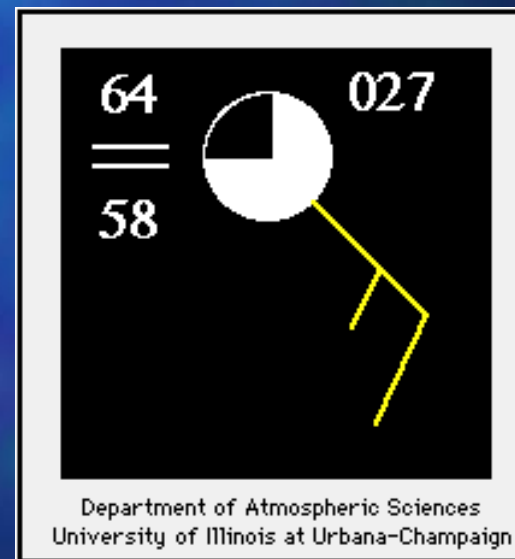
EQUAZIONE GENERALE DEL VENTO

- se $R = 0$:
 - la particella mantiene velocità costante
- se $R \neq 0$:
 - variazione in velocità o direzione della particella



RAPPRESENTAZIONE DEL VENTO

- il vento viene:
 - identificato con la direzione di provenienza
- il vettore vento:
 - punta nel verso di scorrimento
 - è munito di "barbe" in coda, che ne rappresentano l'intensità:
 - 5 nodi: trattino corto
 - 10 nodi: trattino lungo
 - 50 nodi: triangolino



UNITA' DI MISURA DEL VENTO

■ l'intensità del vento viene misurata in:

- chilometri per ora **KM/H**
- metri per secondo **M/S**
- nodi **KT**

$$1 \text{ KT} = 1,85 \text{ KM/H} = 0,52 \text{ M/S}$$

$$1 \text{ M/S} = 1,94 \text{ KT} = 3,6 \text{ KM/H}$$

$$1 \text{ KM/H} = 0,54 \text{ KT} = 0,28 \text{ M/S}$$

■ unità di misura:

- ICAO prevede **KM/H**
- la scelta è lasciata a decisione nazionale
- **KT** riconosciuto come standard a tempo indeterminato (anche l'Italia lo ha adottato)
- **M/S** utilizzato nell'est europeo

LA SCALA ANEMOMETRICA BEAUFORT

Grado	Termine descrittivo	Classe	Intensità			Descrizione visiva
			[Nodi]	[m/sec]	[Km/h]	
0	Calma	Calma	<1	0+0.2	<1	Il fumo sale verticalmente.
1	Bava di vento		1+3	0.3+1.5	1+5	La direzione del vento è visibile dal movimento del fumo ma non dalla banderuola segnamento.
2	Brezza leggera	Debole	4+6	1.6+3.3	6+11	Si avverte il vento sulla faccia; le foglie si agitano; banderuole ordinarie in movimento.
3	Brezza tesa		7+10	3.4+5.4	12+19	Foglie e ramoscelli in movimento costante; le bandiere leggere iniziano a spiegarsi.
4	Vento moderato	Moderato	11+16	5.5+7.9	20+28	Si sollevano polvere e pezzi di carta; rami degli alberi in movimento.
5	Vento teso		17+21	8+10.7	29+38	Gli alberelli ondeggiando; si increspano le acque interne (laghi, stagni, ecc.).
6	Vento fresco	Forte	22+27	10.8+13.8	39+49	Grossi rami in movimento; difficoltà nell'uso degli ombrelli.
7	Vento forte		28+33	13.9+17.1	50+61	Interi alberi in movimento; camminando controvento si prova fastidio in faccia.
8	Burrasca	Molto forte	34+40	17.2+20.7	62+74	Si spezzano i rami degli alberi; generale impedimento all'avanzamento.
9	Burrasca forte		41+47	20.8+24.4	75+88	Si verificano leggeri danni alle costruzioni (si spostano piccoli oggetti e le tegole).
10	Tempesta	Tempesta	48+55	24.5+28.4	89+102	Considerevoli danni alle abitazioni; sradicamento di alberi; onde molto alte in mare.
11	Tempesta violenta		56+63	28.5+32.6	103+117	Danni ingenti su vasta scala.
12	Uragano		64 ed oltre	32.7 ed oltre	118 ed oltre	Danni ingentissimi in breve tempo su vasta scala.

LA ROSA DEI VENTI

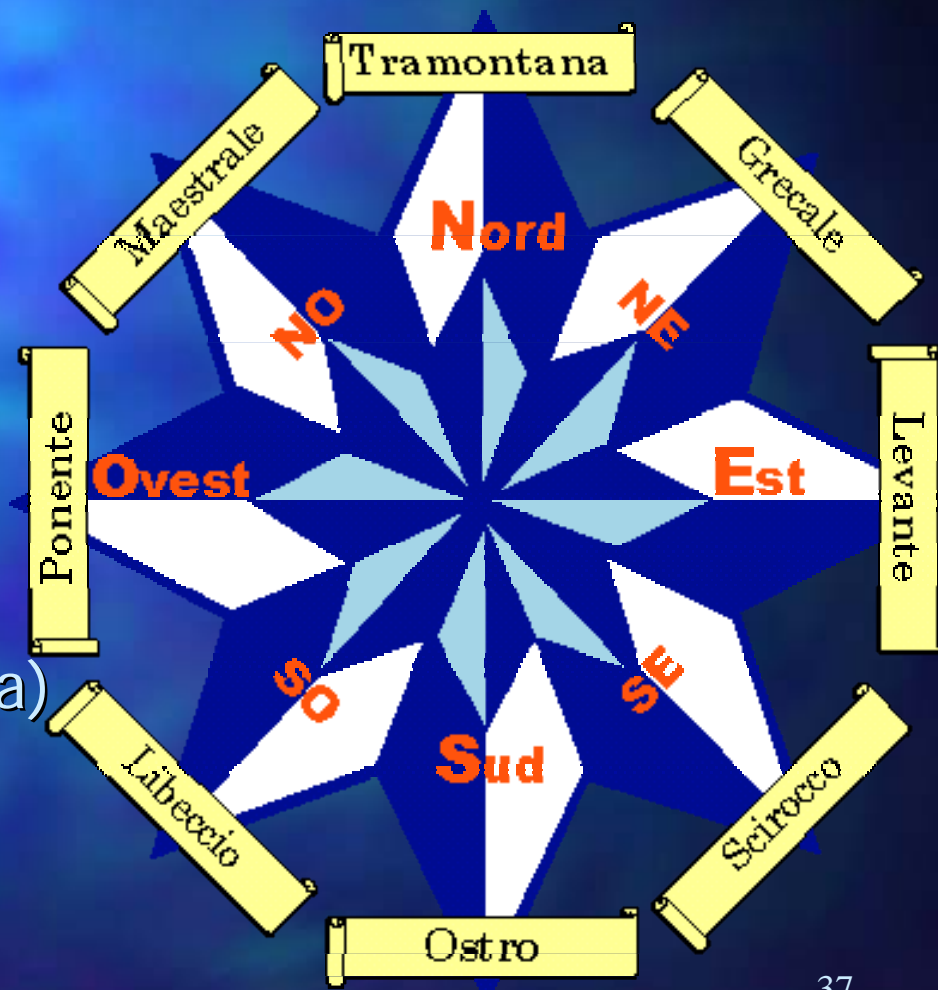
Il nome dei venti è stato assegnato dai Veneziani, che chiamarono, avendo come centro il Mar Ionio:

Grecale: da NE (Grecia)

Maestrale: da NW (Venezia)

Scirocco: da SE (Siria)

Libeccio: da SW (Libia)



LA ROSA DEI VENTI



VENTI PARTICOLARI

- venti permanenti
 - alisei (trade winds)
 - venti occidentali (westerlies)
- venti periodici
 - monsoni
 - brezze di mare e di terra
- venti catabatici o di caduta
 - il foehn

ALISEI

- velocità e direzione costanti lungo tutto l'anno
- tra latitudini Nord e Sud comprese tra 5° e 30°
- quote inferiori a 1 - 2 km (venti al suolo)
- caratteristiche:
 - velocità media circa 13 nodi (molto regolari sul mare)
 - secchi e freschi
- causati da:
 - spostamento aria da fascia H subtropicale a L equatoriale
 - Coriolis \Rightarrow da NE a Nord e da SE a sud
 - convergenza all'equatore in fascia di 3° - 5° latitudine
 \Rightarrow **calme equatoriali** o **convergenza intertropicale ITCZ**
- circolazione invertita in quota \Rightarrow **controalisei**

VENTI OCCIDENTALI

- zone temperate oceaniche entrambi emisferi
- tra latitudini 40° e 60°
- regolarità disturbate da depressioni mobili
⇒ perturbazioni

MONSONI

- circolazione termica a scala sinottica
- variazioni stagionali in latitudine della ITCZ
 - estate emisfero N:
 - ITCZ oltre i 10° - 15° N su Africa e oltre i 20° - 30° N su Himalaya
 - alisei di SE dell'emisfero S vengono spinti oltre Equatore
 - ruotano da SE a SW per Coriolis
 - correnti umide e ricche di pioggia dall'Oceano Indiano
 - ⇒ **monsone estivo dell'India**
 - inverno emisfero N:
 - ITCZ si sposta verso sud
 - ITCZ non attraversa completamente Equatore
 - si ripristinano gli alisei di NE dell'emisfero N
 - ⇒ il **monsone invernale** coincide con l'aliseo di NE

LE BREZZE DI MARE E DI TERRA

- ore diurne:
 - suolo si scalda più velocemente del mare
 - aria a contatto con il suolo:
 - diviene più calda di quella a contatto con il mare
 - si solleva in quota
 - determina un richiamo dal mare di aria nei bassi strati
⇒ brezza di mare
 - la brezza di mare:
 - si manifesta dalla tarda mattinata
 - intensità max nel pomeriggio
 - si annulla in serata
- ore notturne:
 - suolo si raffredda più rapidamente del mare
 - nei bassi strati si determina un flusso contrario
⇒ brezza di terra (da mezzanotte a poco dopo alba)

LE BREZZE DI MARE E DI TERRA

- limitato strato atmosferico
- in quota hanno venti di ritorno:
 - intensità più debole
 - chiudono il ciclo verticale della circolazione
- intensità:
 - modesta (10 - 20 nodi)
 - brezza di mare più forte brezza terra
- il regime delle brezze:
 - viene solitamente mascherato da altri venti
 - può modificare intensità e direzione venti persistenti

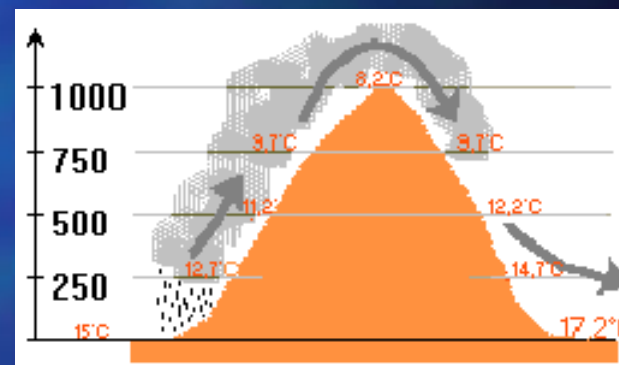
LE BREZZE DI MONTE E DI VALLE

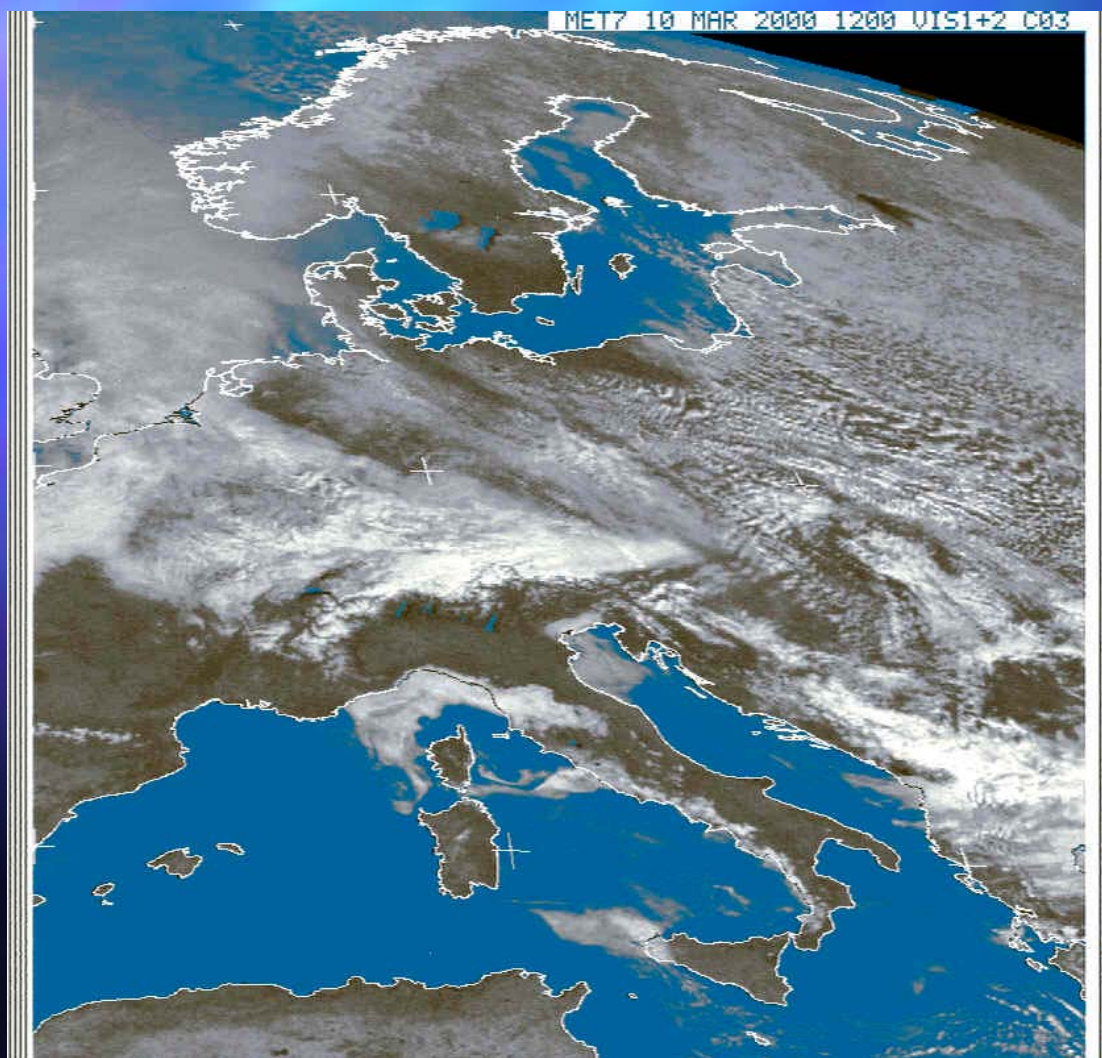
- ore diurne:
 - maggior riscaldamento dei pendii
 - aria più leggera tende a portarsi in quota
 - richiamo di aria da fondo valle ⇒ **brezze di valle**

- ore notturne:
 - forte raffreddamento notturno aria lungo i pendii
 - aria più pesante scivola a valle anche aiutata da gravità
⇒ **brezze di monte**

IL FOEHN: EFFETTO STAU-FOEHN

- vento di caduta caldo e asciutto (UR del 18-20%)
- aria fredda umida da Atlantico settentrionale:
 - impatta l'arco alpino
 - sopravvento aria umida in ascesa:
 - si raffredda di $-0,6^{\circ}\text{C}/100\text{m}$
 - scarica umidità (stau - foehn wall)
 - sottovento aria secca in discesa:
 - si scalda di $+1^{\circ}\text{C}/100\text{m}$
 - scende verso Pianura Padana (foehn)
- effetto stau-foehn:
 - presente su tutte catene montuose
 - nomi diversi:
 - chinook sulle Montagne Rocciose
 - ghibli in Libia





Una bella immagine di **foehn** ripresa dal satellite Meteosat, nel campo del visibile, il 10 Marzo 2000 alle ore 12.00 UTC