

CIRCOLAZIONE, VORTICITÀ E DIVERGENZA

Circolazione

Consideriamo una traiettoria chiusa di lunghezza L immersa in un campo di forze. Posso sempre pensare di suddividerla in tanti tratti di lunghezza infinitesima dL .

Se immaginiamo di immergere questa traiettoria all'interno di un campo di forze, so anche che in ogni punto posso associare un vettore rappresentativo del campo di forze.

Si definisce circolazione o circuitazione la quantità definita da:

$$C = \int_L v \cos \alpha \, dL$$

Ho preso $v \cos \alpha$ in quanto è la componente che si "concatena" con il flusso determinato dalle linee di forza. La componente $v \sin \alpha$, invece, non ci interessa.

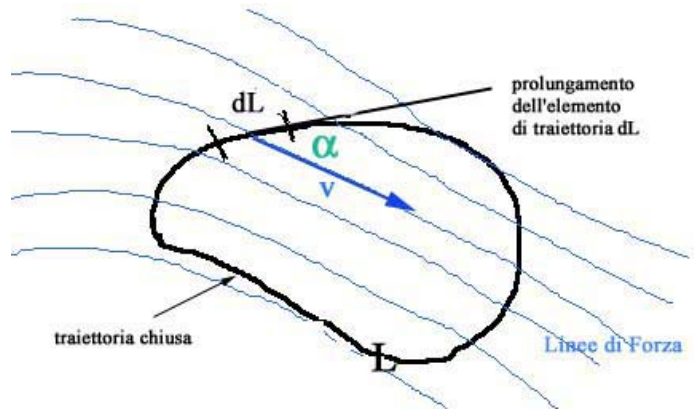


Fig. 1 Circolazione.

Convergenza e Divergenza

Se consideriamo i movimenti verticali, possiamo individuare due processi:

1) Convergenza: è il fenomeno che si manifesta quando in una determinata zona si ha un apporto di aria maggiore di quanta ne defluisce.

La convergenza al suolo spinge l'aria verso l'alto determinando moti ascendenti di tipo convettivo (portando perciò brutto tempo e pioggia). Al suolo, in corrispondenza, sarà associata una bassa pressione.

2) Divergenza: si manifesta quando su una determinata zona esce più aria di quanta ne arrivi.

Per esempio la divergenza al suolo porta al richiamo di aria dagli strati superiori, determinando moti discendenti di tipo subsidente (con associato tempo bello e stabile). Al suolo, in corrispondenza, sarà associata un'alta pressione.

Vorticità

In meteorologia il concetto di vorticità si riferisce ad una misura dello spin (rotazione su se stessa) di piccole porzioni di aria. Sebbene tale grandezza possa essere riferita ad un qualsiasi asse di rotazione, nella nostra trattazione ci riferiremo ad una massa d'aria che scorre orizzontalmente (vento) e, come asse preferenziale, andremo a considerare un asse verticale rispetto a tale direzione di spostamento.

Il nostro obiettivo sarà quello di verificare in quale maniera la vorticità possa essere utilizzata per identificare le regioni di divergenza e di convergenza dell'aria nell'ambito dello sviluppo di un ciclone extra tropicale (CET).

Normalmente all'aria che ruota in senso antiorario (ciclonico), viene attribuita vorticità positiva (+).

Similmente, all'aria che ruota in senso orario (anticiclonica), viene attribuita vorticità negativa (-).

Il concetto di vorticità viene delineato schematicamente nell'immagine di figura 2.

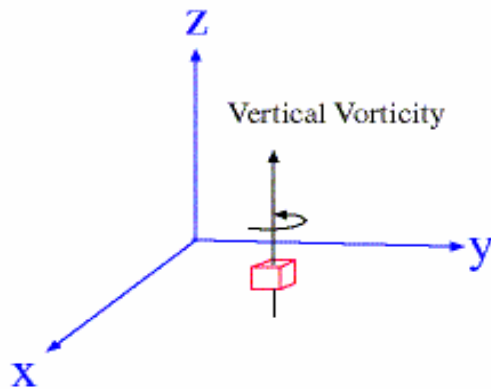


Fig. 2 Vorticità verticale.

Tenendo presente la figura, se ipotizziamo la presenza al suolo di un'area caratterizzata da debole vorticità positiva e, quindi, a chiusura ciclonica e ammettiamo di studiare ciò che avviene sulla sua verticale, ipotizzando l'esistenza di una barriera invisibile che separa il cubo e la colonna d'aria sovrastante dall'aria circostante, possiamo osservare che se in quota si instaurano condizioni di divergenza (cioè condizioni tali per cui defluisca più aria di quanta non ne arrivi), come conseguenza, alla base della nostra colonna immaginaria, registreremo una diminuzione della pressione, con conseguente richiamo di aria dalle regioni circostanti.

Ammettendo, infine, che la quantità d'aria, presente nella colonna non cambi, tutto ciò comporterà un'ascesa forzata di aria all'interno della colonna e conseguentemente la vorticità nella colonna tenderà aumentare.

Possiamo pertanto concludere che condizioni di divergenza in quota determinano un aumento della vorticità nelle superfici cicloniche. Questo aspetto, in genere conduce alla ciclogenesi, cioè ai processi di innesco dei CET, oltre che a movimenti di ascesa dell'aria.

Vorticità relativa (q), di trascinamento (f) e vorticità assoluta (Q)

Poiché la Terra ruota su sé stessa, appare chiaro che tutti gli oggetti che si trovano in essa, anche le particelle di aria, saranno soggette a questo movimento e, pertanto, dotate di una certa vorticità, detta vorticità di trascinamento.

Nelle ipotesi precedentemente introdotte (ricordandoci che siamo interessati ai movimenti di tipo orizzontale) la vorticità di trascinamento risulta definita da:

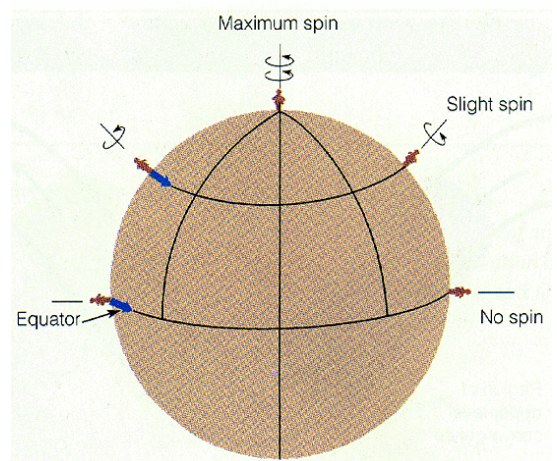


Fig. 3 Vorticità di trascinamento.

CIRCOLAZIONE, VORTICITÀ E DIVERGENZA

$$f = 2\omega \text{ sen } \varphi$$

Come si vede, essa dipende dalla latitudine. Dalla relazione scopriamo che essa è massima ai poli e minima all'equatore (fig. 3).

Nell'emisfero Nord la vorticità di trascinamento è sempre positiva, in considerazione del fatto che la Terra ruota in senso antiorario.

In aggiunta, il movimento di una massa d'aria e delle particelle di aria che la compongono, può comportare l'esistenza di una vorticità aggiuntiva detta vorticità relativa (q).

La vorticità relativa è normalmente il risultato di due effetti:

- 1) la curvatura del flusso d'aria;
- 2) le variazioni della velocità del vento lungo il percorso seguito (Shear).

A tal proposito può essere di un certo aiuto l'analisi delle figure 4 e 5. Nella prima, in particolare, è possibile osservare come nelle regioni a curvatura anticiclonica (promontorio) le particelle acquistino vorticità negativa, mentre nelle regioni a chiusura ciclonica (saccatura), le particelle acquistino vorticità positiva.

Similmente, ogni qualvolta il vento risulti più intenso da un lato di una particella di aria piuttosto che in un altro, alla stessa viene applicata una forza di rotazione che porta ad un incremento oppure ad una diminuzione della sua vorticità relativa.

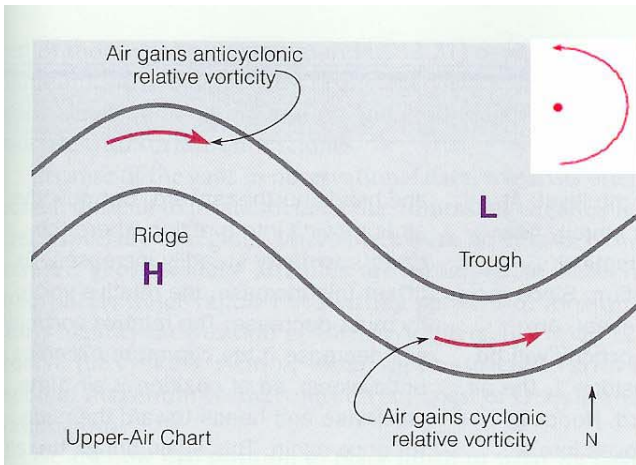


Fig. 4 Dipendenza della vorticità dalla curvatura.

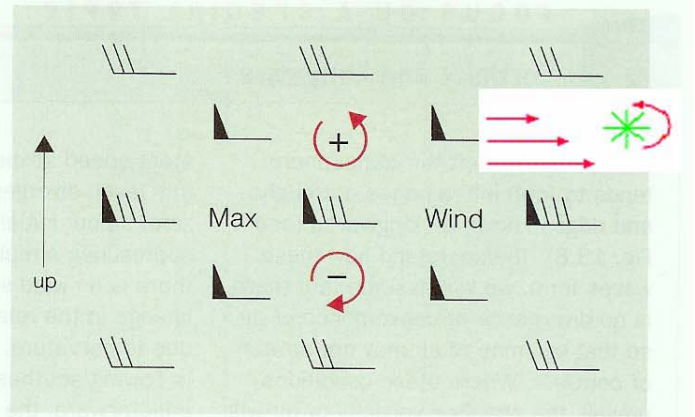


Fig. 5 Dipendenza della vorticità dallo shear.

La somma della vorticità di trascinamento e di quella relativa definiscono la vorticità assoluta, definita da:

$$Q = q + f$$

Siamo così in condizioni di vedere in che modo la vorticità in quota possa collegarsi alla divergenza ed allo sviluppo dei CET. Nella figura 6 possiamo osservare una situazione piuttosto frequente su una carta in quota.

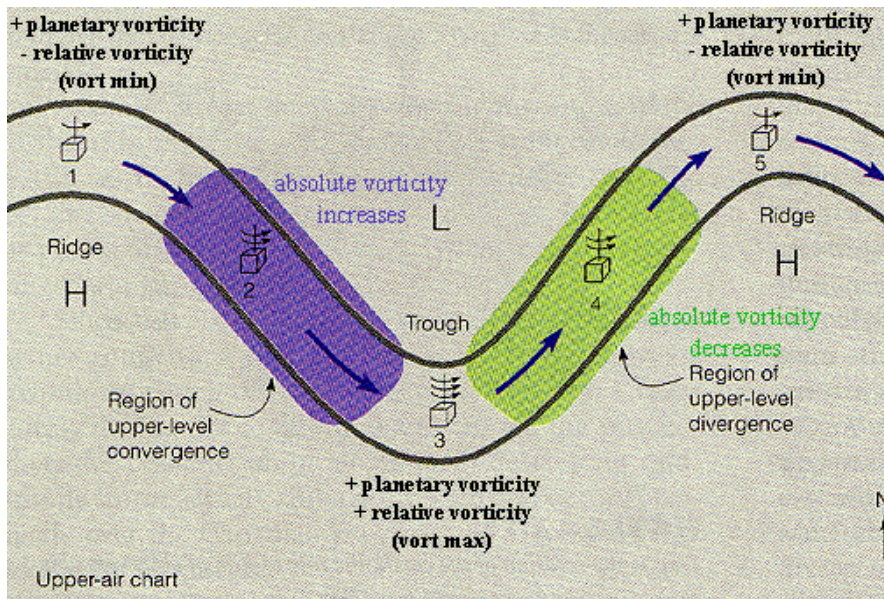


Fig. 6 Variazione della vorticità assoluta lungo una traiettoria, in quota.

Si osservi innanzitutto che, in qualsiasi posizione, la particella è caratterizzata da una vorticità assoluta di tipo ciclonico, cioè positiva, come conseguenza del fatto che alle medie latitudini la vorticità di trascinamento è sufficientemente intensa da far sì che le particelle abbiano una vorticità assoluta di tipo ciclonico pressoché ovunque. Trascuriamo infine, per semplicità, le possibili influenze dovute a variazioni del vento (shear).

CIRCOLAZIONE, VORTICITÀ E DIVERGENZA

Nella posizione 1, in corrispondenza del promontorio la particella è dotata unicamente di una debole vorticità di tipo ciclonico, in conseguenza del fatto che la vorticità assoluta è il risultato della differenza tra la vorticità di trascinamento (positiva o di tipo ciclonico) e quella relativa (negativa, a causa della curvatura che è di tipo anticiclonico).

Nella posizione 2 la vorticità relativa dovuta alla curvatura è nulla e pertanto la vorticità assoluta va ad aumentare.

Nella posizione 3 la vorticità della particella assume il valore massimo, poiché agli effetti precedenti si aggiunge anche il carattere ciclonico dovuto alla curvatura della traiettoria.

Nella posizione 4 la traiettoria seguita è nuovamente rettilinea e, quindi, la vorticità assoluta torna a diminuire, per raggiungere un nuovo minimo nella posizione 5.

In definitiva, quando una particella di aria (rappresentata schematicamente da un cubo) si muove attraverso il flusso di aria dalla posizione 1 alla posizione 3, la sua vorticità assoluta aumenta nel tempo. In questa regione (colorata in violetto) è normalmente possibile individuare un'area di convergenza in quota.

Allorché la particella di aria si sposta dalla posizione 3 alla posizione 5, la sua vorticità assoluta diminuisce nel tempo. In questa regione (colorata in verde) si registra la presenza di divergenza in quota.

Possiamo perciò concludere affermando che ad un aumento della vorticità assoluta in una particella di aria in quota, in movimento, è associato ad un processo di convergenza in quota, mentre una diminuzione della sua vorticità assoluta è associata ad un processo di divergenza in quota. Inoltre, il fenomeno sarà tanto più intenso quanto maggiore sarà l'incremento nel tempo della vorticità assoluta.

Nella figura 8 è possibile osservare come vorticità, divergenza, moti ascendenti e sviluppo dei CET, siano aspetti strettamente connessi. In base a quanto visto fino ad ora, in corrispondenza della saccatura in quota (500hPa), possiamo identificare i massimi di vorticità. Ad Est di tale massimo è possibile individuare un'area di divergenza in quota e, conseguentemente di convergenza al suolo. Questo fatto comporta possibili ascese di aria e, di conseguenza, la formazione di nuvolosità associata a precipitazioni, nonché lo sviluppo di un CET (bassa pressione al suolo, L).

Possiamo perciò concludere osservando che quando un massimo di vorticità in quota si muove verso un fronte stazionario, si verrà a formare un'onda lungo il fronte, con il risultato che il CET potrà svilupparsi. Ma non è la regola: è, infatti, possibile che, anche in assenza di un fronte, si sviluppino nuvolosità associate a precipitazioni, in corrispondenza di un massimo di vorticità in quota.

Spostandoci ad Ovest, rispetto ad un massimo di vorticità (oppure ad Est, rispetto ad un minimo di vorticità), è possibile identificare un'area di convergenza in quota, associata ad una corrispondente area di divergenza al suolo. In corrispondenza di questa colonna le condizioni saranno caratterizzate da tempo bello (assenza di nubi e di precipitazioni), conseguenza del moto discendente dell'aria, associato alla presenza di un anticiclone (H) in al suolo.

Va infine osservato come, dal punto di vista pratico, la localizzazione dei massimi di vorticità non sia affatto semplice, sia a causa delle discontinuità nella fase di acquisizione dei dati mediante sonda meteorologica che attraverso immagini via satellite, specie in regioni caratterizzate da scarsa presenza di vapore acqueo (elemento essenziale per l'identificazione di tali massimi).

Relazione tra vorticità e circolazione

Dato un sistema in moto rotatorio con velocità angolare ω su una traiettoria circolare di raggio r , è possibile verificare l'esistenza di una relazione tra le due grandezze ora definite.

Per intanto si sa che:

1. $v = \omega r$ (si osservi che rispetto alla definizione data in precedenza per la circolazione, nel caso in questione risulta che $v \cos \alpha = \omega r$, essendo $\alpha = 0$ e quindi $\cos \alpha = 1$)
2. $L = 2\pi r$

Il calcolo della circolazione mi permette di osservare che (si ricordi che $S = \pi r^2$):

$$C = 2 \pi r \omega r = 2\omega \pi r^2 = 2\omega S$$

Ne segue, banalmente, che:

$$\boxed{C/S = 2\omega}$$

Teorema di conservazione della vorticità assoluta

E' possibile dimostrare che:

$$\boxed{Q = \text{cost.}}$$

espressione del Teorema di conservazione della vorticità assoluta. Questo significa che, essendo che $Q = q + f$, e dovendo questa somma mantenersi costante, necessariamente deve risultare che se per una qualsiasi ragione la vorticità relativa cala, allora automaticamente aumenta la vorticità di trascinamento e viceversa.

$$Q = \text{cost.} \left\{ \begin{array}{l} q \uparrow \Leftrightarrow f \downarrow \\ q \downarrow \Leftrightarrow f \uparrow \end{array} \right.$$

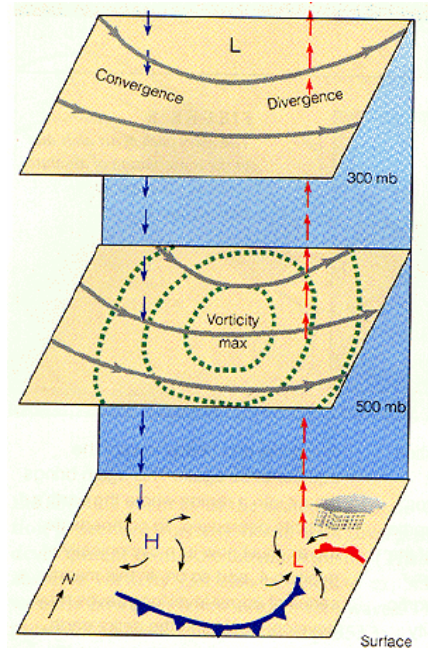


Fig. 7 Relazione tra vorticità e fenomeni di convergenza e divergenza.

CIRCOLAZIONE, VORTICITÀ E DIVERGENZA

Se a questo punto pensiamo che affinché possa variare la vorticità di trascinamento la particella deve modificare la sua latitudine, possiamo comprendere l'importanza di tutto ciò nell'ambito meteorologico.

Se una particella, nell'emisfero nord, tende a scendere in latitudine, per il principio di conservazione della vorticità assoluta, devierà, determinando una circolazione di tipo depressionario.

Se una particella tende a salire in latitudine, per lo stesso principio, devierà, determinando una circolazione di tipo anticiclonico.

Questi aspetti diventano particolarmente interessanti quando si analizza l'influenza degli ostacoli nel moto del vento (Fig. 8), ovvero nello studio delle perturbazioni che si sviluppano nel lato sottovento di una montagna.

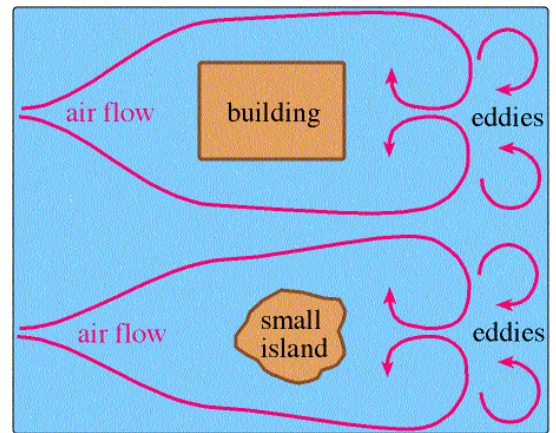


Fig. 8 Formazione di vortici in corrispondenza di piccoli ostacoli.

Cenno alle onde di Rossby

Nella circolazione generale dell'atmosfera nel regime permanente dei venti da ovest si trovano, come medie su un emisfero, delle onde caratterizzate da vorticità assoluta costante, molto lunghe, chiamate Onde di Rossby. Esse sono delle onde, quasi stazionarie, con movimento verso W, di lunghezza compresa tra 4000÷8000km, che, in numero di 4÷6, avvolgono interamente il pianeta.

Hanno richiamato l'attenzione dei meteorologi perché lungo i loro rami ascendenti si sposterebbero le famiglie di cicloni extra tropicali.

Nelle prime tecniche di previsione la traiettoria futura dei cicloni extra tropicali rappresentava uno dei maggiori problemi. Le onde di Rossby vennero perciò impiegate per prevedere la traiettoria dei cicloni.

Si ritiene che la presenza di onde corte, caratterizzate da un rapido movimento verso Est, sia legata alla formazione ed allo sviluppo dei cicloni extra tropicali.

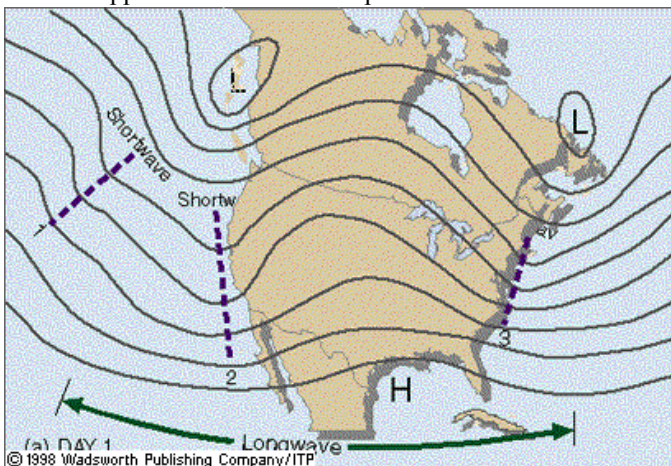


Fig. 9 Onde di Rossby (onde lunghe) e onde corte.

Le onde di Rossby sono caratterizzate da una velocità pari a:

$$C_R = v - (2\omega_T \cos\phi / 4\pi R)L^2$$

dove v esprime la velocità del vento zonale; ω_T la velocità angolare della Terra ($729 \cdot 10^{-7}$ rad/s); R il raggio terrestre; L la lunghezza dell'onda.

Riferimenti Bibliografici

- Ahrens, "Meteorology Today: An Introduction to Weather, Climate, and the Environment" Brooks & Cole Pub Co.
- Barry, Chorley "Atmosphere, weather & climate" Ed. Routledge, Londra
- <http://apollo.lsc.vsc.edu/>
- Sannino "Meteorologia Nautica" Ed. Italibri