

7 LA CIRCOLAZIONE GENERALE

(ANDREA GIULIACCI E MARIO GIULIACCI)

◇◇◇ 7.1 LA CIRCOLAZIONE GENERALE DELL'ATMOSFERA

L'andamento medio del vento e della pressione atmosferica osservato sul pianeta nel corso di molti decenni è la *circolazione generale dell'atmosfera*. Ovviamente è un'astrazione perchè ogni giorno in ogni parte del globo vi sono deviazioni più o meno palesi da questo schema. E per fortuna! Altrimenti pioggia, siccità, caldo e freddo insisterebbero, ogni anno e con le medesime modalità, sempre sulle stesse aree del pianeta.

◇◇◇
Tali scostamenti quotidiani dallo scenario previsto dalla circolazione generale non sono altro che *il tempo*. Se il disaccordo persiste su una medesima area per settimane o addirittura per mesi, siamo, invece, di fronte a una *anomalia* nella circolazione generale dell'atmosfera. Se poi l'anomalia dura per decenni, allora si tratta di un *cambiamento climatico*.

Comunque, la struttura orizzontale della circolazione dell'atmosfera a un dato istante su scala planetaria mostra una grande complessità, perchè i moti osservati sono generati dalla sovrapposizione simultanea di numerosi altri, alcuni a scala planetaria, altri a scala continentale stagionale, altri ancora a scala locale come quelli legati alle brezze, all'influenza deformatrice dell'orografia, ai temporali, agli ostacoli al suolo e alla turbolenza. Per fortuna, tali moti hanno dimensioni spaziali e durate temporali molto diverse tra di loro, per cui con opportune medie nello spazio e nel tempo è possibile separare le caratteristiche dei moti più grandi e più duraturi da quelli più piccoli e di più breve durata. Ma come si origina la circolazione generale dell'atmosfera? Per rispondere occorre partire un po' da lontano. Stiamo per iniziare insieme un viaggio che vi consentirà di fare la conoscenza con protagonisti famosi delle vicende del tempo e del clima: *Anticiclone delle Azzorre, Ciclone dell'Islanda, Anticiclone russo, cicloni extra-tropicali, Alisei, Monsoni, fronti correnti occidentali, corrente a getto* fanno tutti parte della grande famiglia della circolazione generale dell'atmosfera.

La circolazione generale dell'atmosfera è la diretta conseguenza della diversa intensità con cui il Sole riscalda le basse e le alte latitudini. E in effetti il bilancio energetico al suolo su base annuale tra la radiazione solare assorbita e la radiazione persa per irraggiamento nell'infrarosso, mostra un surplus di calore all'Equatore e un deficit ai Poli.

Latitudine	Frazione dell'area totale	Radiazione corta assorbita	Radiazione lunga emessa	Surplus (+) o deficit (-)
90°-60°	0,14	0,13	0,30	-0,17
60°-40°	0,22	0,23	0,29	-0,06
40°-20°	0,30	0,34	0,32	+0,02
20°-0°	0,34	0,39	0,29	+0,10

Tabella 7.1 - Bilancio energetico alle varie latitudini (in cal/cm² al minuto).

Se tale disomogeneità non venisse prima o poi rimossa, la temperatura all'Equatore dovrebbe aumentare senza sosta, anno dopo anno, mentre quella ai Poli dovrebbe essere in costante diminuzione. Siccome in realtà, almeno negli ultimi 6000-10.000 anni, lo squilibrio termico Equatore-Poli non ha subito grossi scossoni, allora bisogna ipotizzare che nell'atmosfera esista un meccanismo mediante il quale il surplus di calore equatoriale viene trasportato verso più alte latitudini, onde appianare il deficit energetico polare. In effetti la ridistribuzione del calore a scala planetaria è affidata per quasi l'80% alla circolazione generale dell'atmosfera e per il restante 20% alle correnti oceaniche.

Partendo da tale presupposto, Hadley nel 1735 propose il primo modello per descrivere la circolazione generale. In tale modello si suppone, per semplicità, che la Terra sia priva di rotazione (forza di Coriolis = 0) e che abbia superficie omogenea, così da poter trascurare il diverso riscaldamento stagionale tra oceani e continenti. Sulla colonna d'aria equatoriale il riscaldamento, dovuto al surplus di calore, provoca un moto ascendente all'interno della colonna stessa, mentre il progressivo raffreddamento da deficit calorico sulla corrispondente colonna d'aria polare aumenta la densità dell'aria, instaurando così moti discendenti (figura 7.1a).

Nella porzione troposferica superiore della colonna d'aria equatoriale le correnti ascendenti determinano, per apporto d'aria dagli strati sottostanti, un aumento della pressione atmosferica (perché aumenta il peso della colonna d'aria avente la sua base nella media troposfera), con conseguente formazione di un'alta pressione rispetto alle zone circostanti. Al contrario nella parte superiore della colonna d'aria posta a latitudini polari, la sottrazione d'aria provocata dalle correnti discendenti favorisce la formazione di una bassa pressione rispetto alle aree circostanti (figura 7.1b). L'equilibrio tra le due colonne si è così spezzato, perché alle quote superiori le masse d'aria verranno sospinte dall'alta pressione verso la bassa pressione, ossia dall'Equatore verso i Poli (figura 7.1c). Ma tale

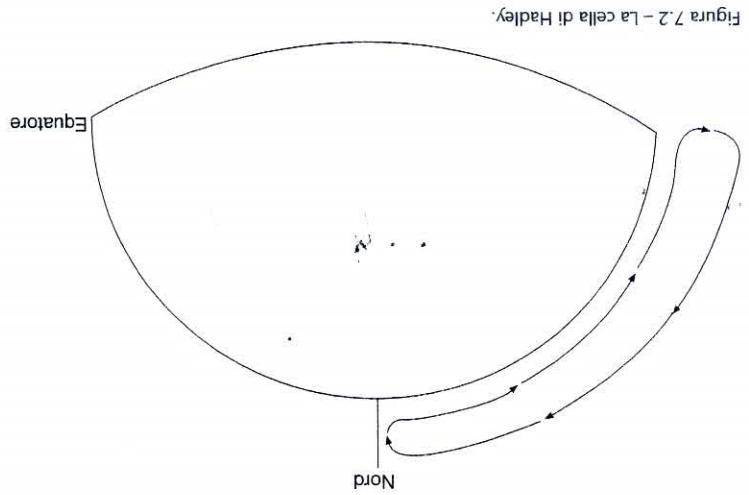
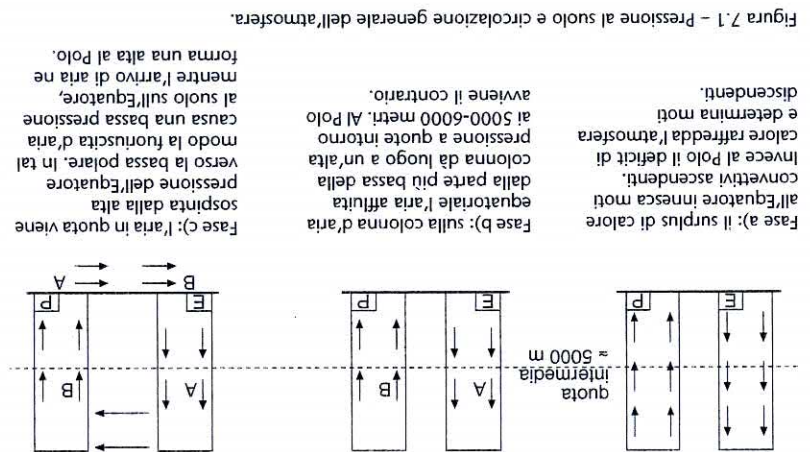


Figura 7.2 – La cella di Hadley.

Di conseguenza in prossimità del suolo, le masse d'aria saranno sospinte dal Poli verso l'Equatore e quindi tra alte e basse latitudini si instaura una megacella convettiva chiusa (si veda la figura 7.2), denominata *cella di Hadley*. Tale cella permetterebbe di spiegare gli scambi di calore tra Equatore e Poli.



fuoriuscita orizzontale di aria dalla colonna equatoriale determina, rispetto alle zone circostanti, una bassa pressione al suolo alla base della colonna, perché è diminuito il peso della colonna d'aria sovrastante. Viceversa l'afflusso di aria equatoriale sulla colonna polare dà luogo al suolo a un'alta pressione rispetto alle zone circostanti, essendo aumentato il peso totale che la colonna d'aria esercita sulla sua base al suolo.

In prossimità dell'Equatore si osserva una cintura di basse pressioni, mentre il Polo Nord e quello Sud sono sede di alte pressioni. Invece intorno a 30° N e 30° S è presente, in maniera permanente, la cosiddetta fascia di alta pressione sub-tropicale, della quale fanno parte l'Anticiclone delle Azzorre e l'Anticiclone del Pacifico.

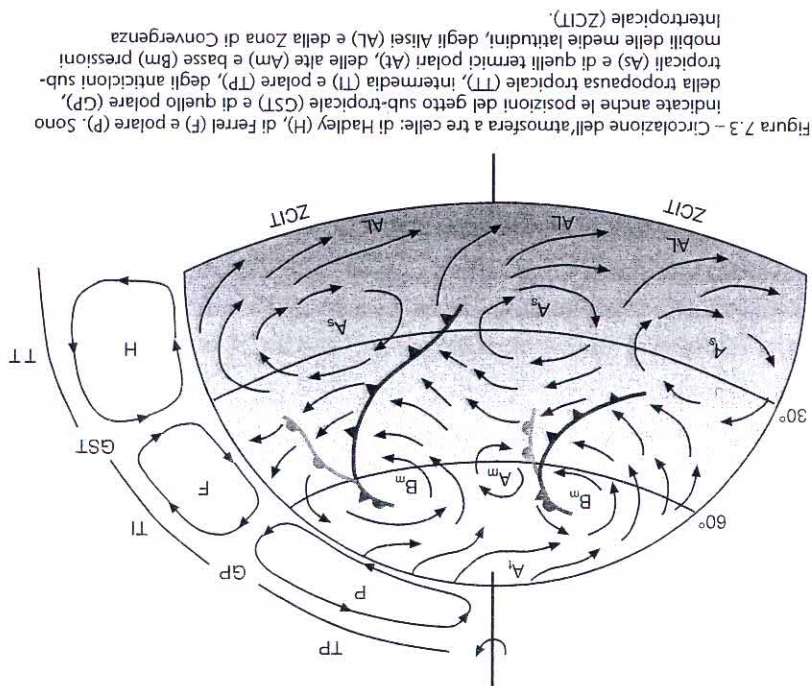


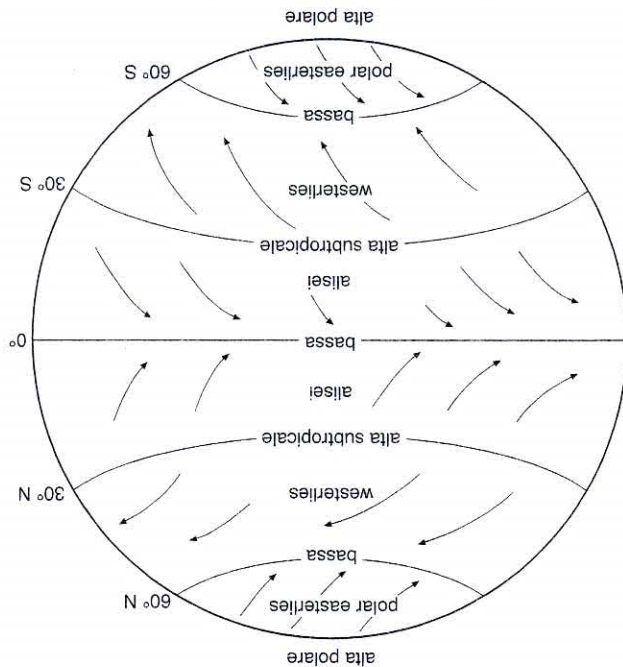
Figura 7.3 - Circolazione dell'atmosfera a tre celle: di Hadley (H), di Ferrel (F) e polare (P). Sono indicate anche le posizioni del getto sub-tropicale (GST) e di quello polare (CP), della tropopausa tropicale (TT), intermedia (TI) e polare (TP), degli anticicloni sub-tropicali (As) e di quelli termici polari (At), delle alte (Am) e basse (Bm) pressioni mobili delle medie latitudini, degli Alisei (AL) e della Zona di Convergenza intertropicale (ZCIT).

Il modello di circolazione proposto da Hadley mostra in realtà molte discrepanze rispetto alla circolazione generale realmente osservata nell'atmosfera. Nelle figura 7.3 è rappresentata la circolazione generale dell'atmosfera, così come viene osservata, secondo un modello detto a tre celle; la figura 7.4 mostra invece le caratteristiche medie effettive della pressione e del vento in prossimità del suolo.

◊◊ 7.1.2 LA CIRCOLAZIONE REALE OSSERVATA A SCALA PLANETARIA

Se adesso si introduce l'effetto di deviazione delle correnti orizzontali da parte della forza di Coriolis (verso la destra del moto nell'emisfero nord e verso sinistra in quello sud), si deduce che, ad esempio nell'emisfero nord, a qualsiasi latitudine le correnti della media-alta troposfera, dirette dall'Equatore verso il Polo, tenderanno ad acquistare una forte componente occidentale, mentre quelle di ritorno nella bassa troposfera dovranno avere una componente orientale.

Figura 7.4 – Schema dei valori medi di vento e pressione osservati al suolo.



Sotto l'azione congiunta della bassa pressione equatoriale e dell'alta pressione sub-tropicale, tra l'Equatore e i 30 gradi latitudine scorrono per tutto l'anno venti da nordest nell'emisfero nord e da sud-est nell'emisfero sud. Tali venti sono gli *Alisei*, i quali hanno il merito storico di aver reso possibile le grandi esplorazioni marine del passato e le traversate dell'Atlantico quando la navigazione era affidata esclusivamente alle vele. Per questo motivo sono noti anche come *Trade winds*.

In particolare, la fascia di basse pressioni intorno a 60° in inverno si intensifica sul mare, ma si interrompe in corrispondenza dei continenti perché su questi ultimi il raffreddamento del suolo, in genere ricoperto di neve, dà luogo a due grandi centri stagionali di alta pressione, uno sul Canada e l'altro sul continente eurasiatico. La parte più occidentale dell'anticiclone eurasiatico è costituita dall'*Anticiclone Russo*, al quale sono collegate le fredde e secche correnti nord-orientali che in inverno talvolta irrompono sull'Adriatico e sulla Val Padana.

In estate, invece, la fascia depressionaria si espande sui continenti – che sono ora più caldi dei vicini oceani – ma tende ad affievolirsi sugli oceani perché in tale stagione i continenti sono, appunto, più caldi delle distese liquide oceaniche.

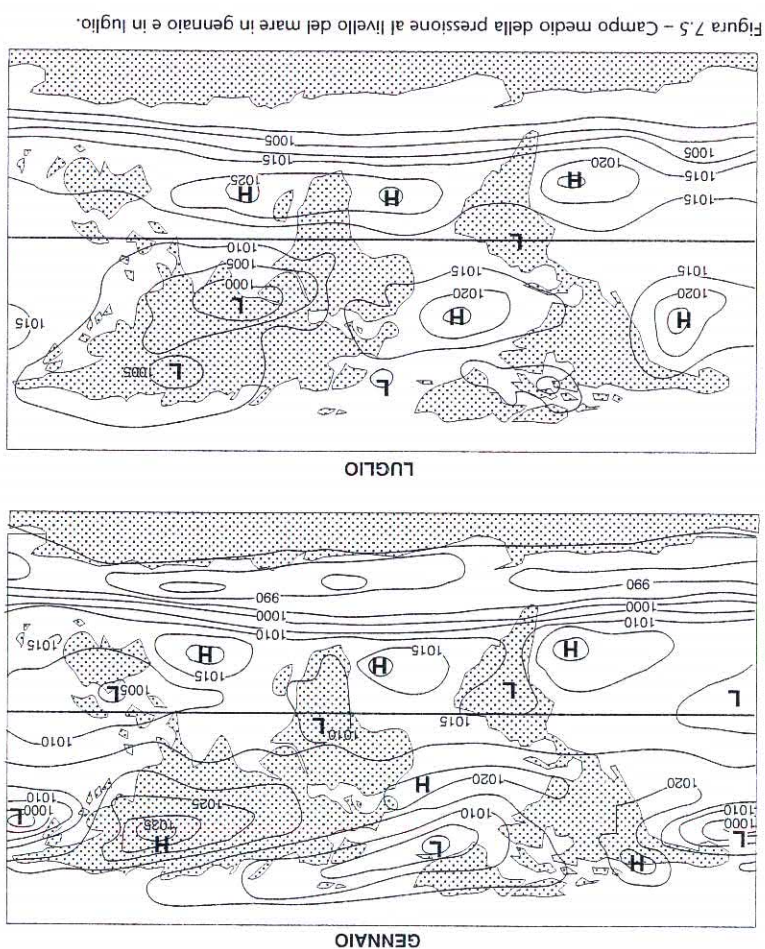
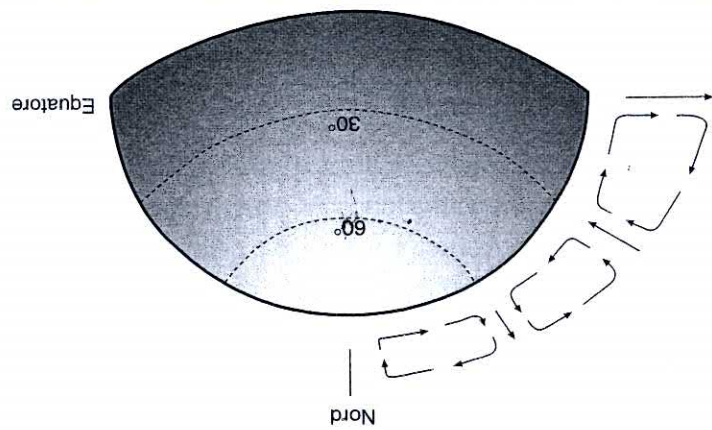


Figura 7.6 – Schema della circolazione generale dell'atmosfera secondo il modello proposto da Hadley.

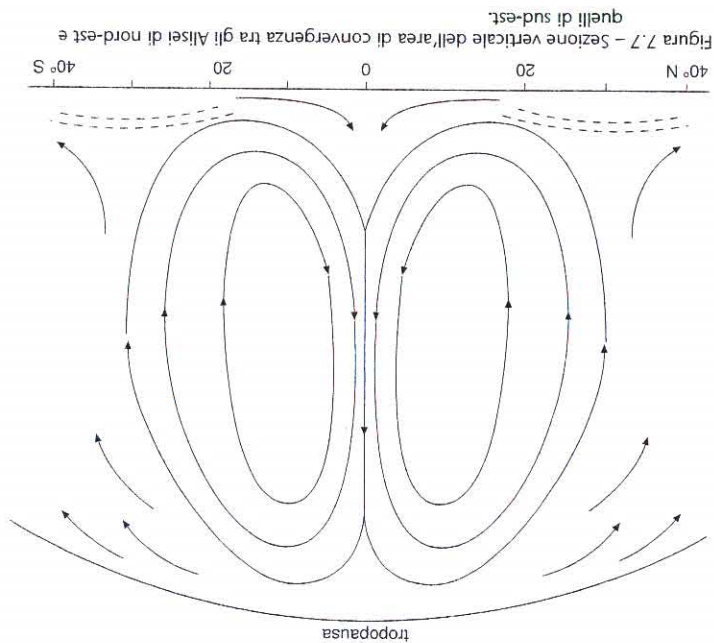


Il modello di Hadley, pur rendendo conto della presenza effettiva della fascia di bassa pressione al suolo all'Equatore e dell'alta pressione ai Poli, è palesemente inadeguato per descrivere la circolazione atmosferica osservata a scala planetaria. In effetti, tale modello non riesce a spiegare alcune importanti caratteristiche, come la fascia di alta pressione sub-tropicale e quella di bassa pressione intorno a 60°. Evidentemente l'ipotesi che la circolazione dell'atmosfera sia regolata solo dallo squilibrio energetico tra Poli ed Equatore non è pienamente valida. Nella figura 7.6 è mostrata la componente meridiana della circolazione atmosferica secondo il modello di Hadley (*circolazione meridiana*) per l'emisfero nord.

7.1.3 UN MODELLO DELLA CIRCOLAZIONE OSSERVATA

Le differenze di pressione tra oceano e corrispondente continente, per effetto dei centri barici a evoluzione stagionale, dà luogo a venti caratteristici (*Monsoni*), i quali in inverno soffiavano dal continente verso la terraferma e in estate in verso opposto (si veda anche il paragrafo 8.1.7). I Monsoni sono piuttosto attivi tra l'Asia e l'Oceano indiano mentre sono trascurabili sull'Atlantico per l'influenza termo-regolatrice della *Corrente del Golfo*. *Nostrium*.

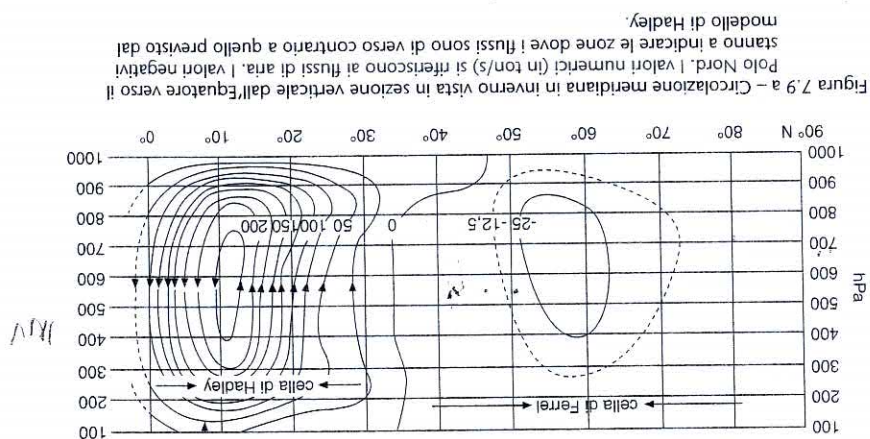
Al contrario, la fascia di alta pressione sub-tropicale in inverno si attenua sul mare, ma tende a saldarsi con l'alta pressione che, per raffreddamento, si forma sui continenti. In estate, invece, si rafforza sugli oceani e si interrompe sui continenti perché, come già detto, su questi ultimi tende a instaurarsi una bassa pressione. In particolare, nella stagione estiva anche il Mediterraneo diviene sede, rispetto alla terraferma circostante più calda, di un'alta pressione che tende a saldarsi con l'anticiclone delle Azzorre, dando l'errata impressione che vi sia un'espansione estiva dell'anticiclone delle Azzorre verso il Mare



cale dell'ITCZ.

sima intensità e sono responsabili della elevata piovosità al di sopra della fascia tropi-
7.8). È qui che le correnti ascendenti calde della cella di Hadley raggiungono la mas-
sei da sud-est dell'emisfero sud (ITCZ, *Inter-Tropical Convergence Zone*, figure 7.7 e
nella quale gli Alisei da nord-est dell'emisfero nord tendono a convergere con gli Ali-
In prossimità dell'Equatore vi è una zona, di posizione variabile tra l'inverno e l'estate,
più aride del pianeta.

to della colonna d'aria. Questo spiega anche perché in tale fascia cadano le regioni
renti discendenti, le quali provocano, per subsidenza, il riscaldamento e l'essiccaamen-
co perché nella fascia sub-tropicale l'atmosfera è animata permanentemente da cor-
deflusso verso il basso fino al suolo, per poi ritornare verso l'Equatore come Alisei. Ec-
di latitudini, un accumulo delle masse d'aria equatoriali, la cui unica via di uscita è il
tal modo anche il loro viaggio verso il Polo. Ciò provoca, però, intorno a tale fascia
verso Nord, siano in realtà ormai allineate quasi da ovest verso est, interrompendo in
riolis, fa sì che, già intorno a 30° di latitudine, le correnti in quota, inizialmente dirette
siva deviazione verso destra (nell'emisfero nord) imposta dalla forza deviante di Co-
nord, ma la cella di Hadley si interrompe intorno a 30° di latitudine perché la progres-
ti ascendenti di aria calda che, dopo aver raggiunto le alte quote, si dirigono poi verso
Sulla verticale dell'Equatore esistono, come previsto dal modello di Hadley, le corren-

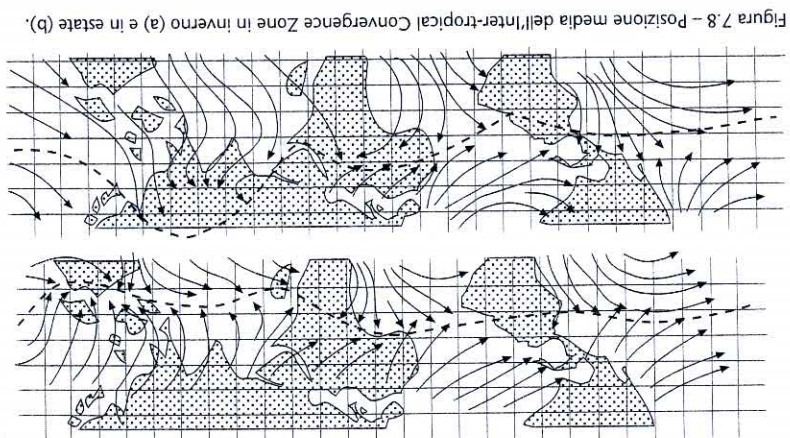


Tra 30° e 60° di latitudine, dove le differenze termiche nord-sud sono più intense, la circolazione media meridionale è di verso opposto a quello previsto, secondo lo schema di Hadley, da una circolazione di tipo termico.

Infatti, in tale cella, denominata *cella di Ferrel*, l'aria si solleva sulla regione più fredda intorno a 60°, per poi ridiscendere nella regione più calda intorno a 30° di latitudine.

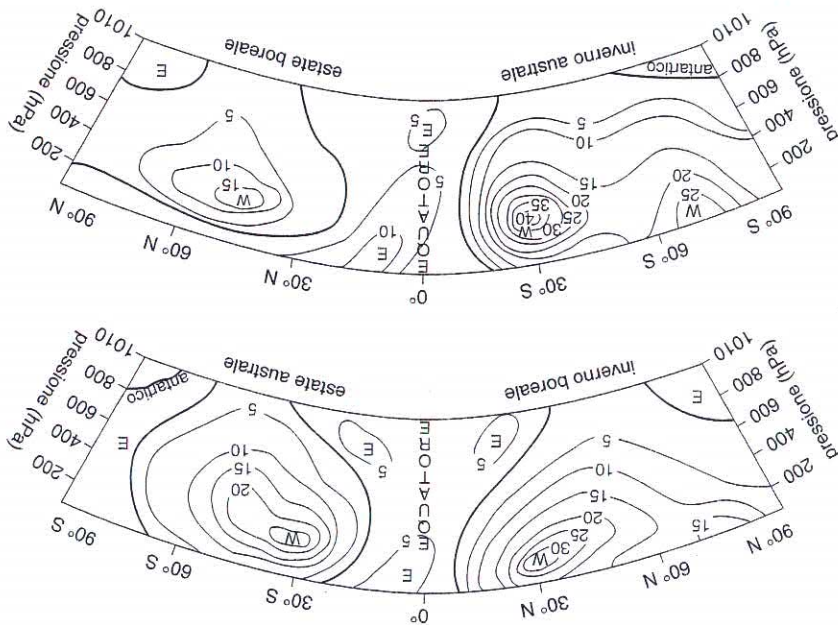
Esiste infine una terza cella sulle regioni polari, caratterizzata in realtà da una circolazione debole. Tale cella è di tipo termico. Infatti l'aria si solleva al di sopra della regione più calda intorno a 60° di latitudine e ridiscende nella zona più fredda che circonda i Poli.

La figura 7.9 mostra una sezione verticale della circolazione meridiana osservata nell'emisfero nord in alcuni periodi dell'anno. È evidente come la cella di Hadley sia molto più estesa e intensa in inverno che in estate. Inoltre in estate si protende verso nord posizione nandosi tra i 15° e i 45° di latitudine, mentre la cella di Hadley dell'emisfero sud si porta con il suo ramo ascendente fino a circa 15° di latitudine nord.



Si riconosce che al suolo i venti hanno una componente da est nella fascia tra 35° N e 35° S, zona appunto occupata dagli Alisei, in corrispondenza del ramo di ritorno della cella di Hadley.

Figura 7.10 - Flusso medio zonale nell'inverno boreale-estate australe (a) e nell'inverno australe-estate boreale (b). Le isotachie, cioè le linee che uniscono i punti in cui l'intensità del vento è la stessa, sono in m/s; la lettera W indica una provenienza da ovest, E indica una provenienza da est.



Anche la cella di Ferrel subisce un corrispondente spostamento stagionale. Infatti, mentre durante l'estate è nella regione tra 45° e 65° di latitudine, in inverno essa si allarga a tutta la fascia compresa tra 35° e 75°.

Nella figura 7.10 è rappresentato invece l'andamento medio osservato nella componente della circolazione zonale (direzione ovest-est), rispettivamente nella stagione estiva e invernale, per entrambi gli emisferi e fino alla mesosfera.

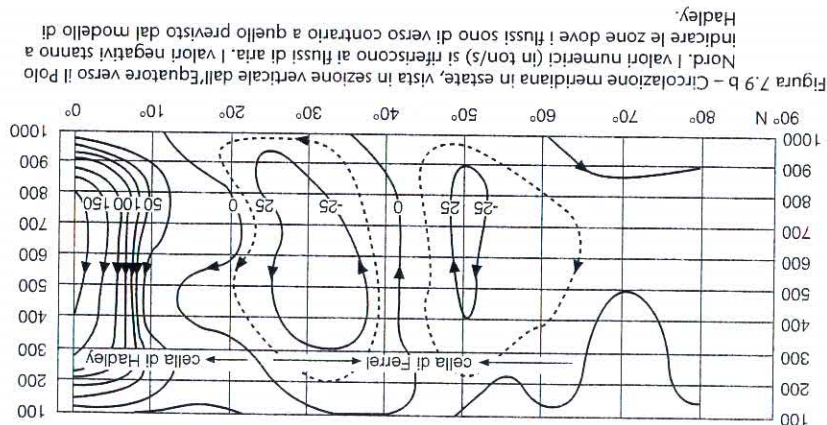
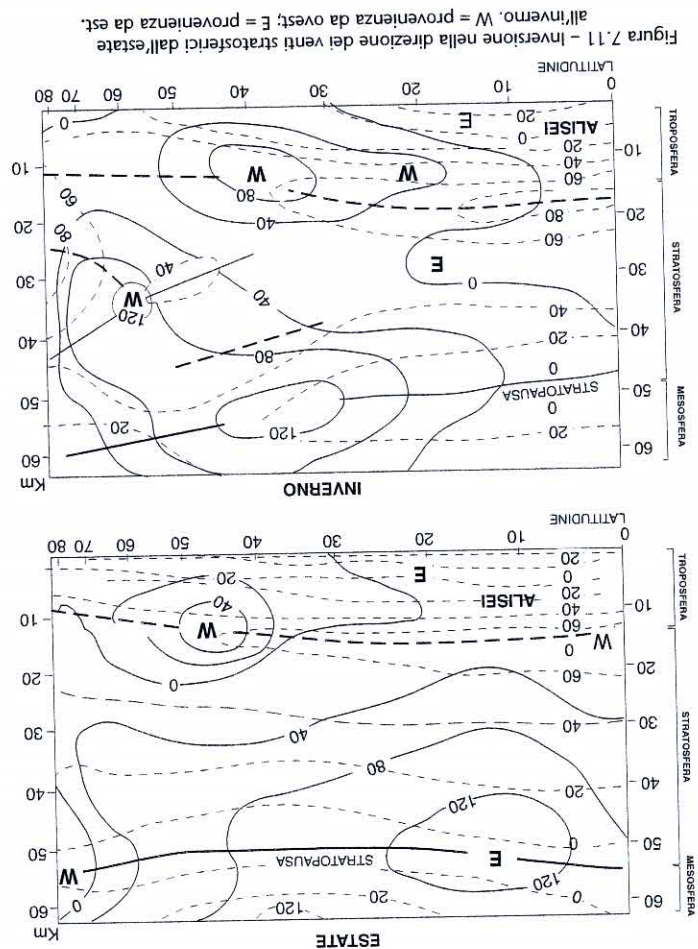


Figura 7.9 b - Circolazione meridiana in estate, vista in sezione verticale dall'equatore verso il Polo Nord. I valori numerici (in ton/s) si riferiscono ai flussi di aria. I valori negativi stanno a indicare le zone dove i flussi sono di verso contrario a quello previsto dal modello di Hadley.

È importante però esaminare le caratteristiche della circolazione zonale non solo nella bassa troposfera, ma anche in quella medio-alta. In quota i venti hanno componente occidentale quasi ovunque, eccetto che nella fascia tra i 15° N e i 15° S, prossima all'Equatore. Alle medie latitudini i venti occidentali crescono gradualmente di intensità con la quota fino a raggiungere il valore massimo immediatamente sotto la tropopausa. Tale ultima caratteristica è legata alla presenza di un gradiente orizzontale sud-nord della temperatura il cui valore è particolarmente intenso appunto alle medie latitudini. Siffatta situazione, come già visto nel paragrafo 6.3, dà luogo a un vento fittizio aggiuntivo (*vento termico*), diretto nella stessa direzione delle correnti occidentali, il cui valore è massimo dove il gradiente termico è più elevato. Nella figura 7.11 si può anche notare la tipica inversione della circolazione zonale tra estate e inverno nella stratosfera

Come già visto con il modello di Hadley, nella troposfera medio-alta dell'Equatore vi è un'alta pressione rispetto alle zone circostanti, mentre sulla verticale dei Poli vi è una bas-



I venti al suolo hanno invece una componente occidentale nella regione delle medie latitudini occupata dalla cella di Ferrel e poi divergono ancora da est alle latitudini polari oltre 65°-70°.

Walker chiamò tale andamento oscillatorio del campo di pressione sul Pacifico-Tropicale Southern Oscillation (SO).

Nella prima metà del XX secolo, G. Walker, dopo uno studio basato su osservazioni meteorologiche provenienti da tutto il mondo e durato quasi trent'anni, trovò che la pressione dell'aria al livello del mare oscilla periodicamente in una regione che va dall'Australia al Sud America. In particolare, quando risulta superiore al normale a Darwin (Australia), nel Pacifico Occidentale, e inferiore alla norma a Tahiti, nel Pacifico Centrale, si verificano piogge abbondanti nel Pacifico Centrale Equatoriale, siccità in India, inverni miti nel Canada Occidentale, ma contemporaneamente particolarmente rigidi nel sud-est degli Stati Uniti. Egli osservò anche che le anomalie di pressione – a volte invertite – a Darwin e Tahiti si ripresentano con una frequenza di pochi anni, così come le stranezze climatiche a esse associate.

7.2.1 ENSO

Quella che è la situazione media della circolazione generale dell'atmosfera, e che identifica le condizioni climatiche per così dire "normali", in realtà subisce continui scostamenti, tanto che raramente la situazione risulta effettivamente rappresentata dalla configurazione normale. Spesso però questi scostamenti si rivelano molto ampi, tali da poter dire che ci troviamo di fronte a vere e proprie anomalie. Ciò avviene spesso per mezzo di grandi fenomeni climatici che periodicamente tornano a manifestarsi, quali ad esempio la NAO, l'ENSO, la PDO o la QBO. Altre volte, invece, anomalie della circolazione generale dell'atmosfera possono essere introdotte da grandi cataclismi naturali quali le eruzioni vulcaniche, oppure dal crescente forcing climatico imposto dall'uomo, ad esempio attraverso l'emissione di prodotti di combustione nell'atmosfera. In ogni caso tutti questi fenomeni sembrano, in un modo o nell'altro, tra loro legati, e in particolare appare ormai chiaro come il crescente effetto serra introdotto dall'uomo sia in grado di modificarne anche tempi e intensità.

7.2 LE ANOMALIE DELLA CIRCOLAZIONE GENERALE DELL'ATMOSFERA

La pressione (vortice polare). Quindi, a scala emisferica, nella troposfera medio-alta la pressione decresce man mano che ci si muove dall'Equatore verso i Poli. Tale dislivello barico in quota tra le basse e le alte latitudini tende a essere tanto più elevato quanto più grande è il surplus di calore equatoriale non rimosso o il deficit polare non ripianato. Siccome in prossimità dell'Equatore la superficie terrestre è occupata in prevalenza dagli oceani, gli Alisei da NE o da SE, nel loro movimento di ritorno verso l'Equatore tendono a riscaldarsi e, nello stesso tempo, ad assorbire quantità notevoli di vapore acqueo. Quando poi le masse d'aria trasportate dagli Alisei raggiungono la ITCZ, le veloci correnti del ramo ascendente della cella di Hadley fanno condensare la loro elevata umidità sotto forma di nubi temporalesche a imponente sviluppo verticale (fino a 20-25 km di altezza). Le immagini dai satelliti evidenziano quotidianamente questa fascia di densa nuvolosità lungo la fascia equatoriale e più marcata sugli oceani.

