

Alta quota

Dr.ssa Loredana Di Carmine
Medico chirurgo,
specialista in
Medicina
Aeronautica
e Spaziale.
Castel di Sangro
(AQ), corso
V. Emanuele 98,
Tel 0864.841664
cell 338.8686315

Le più note manifestazioni fisiopatologiche presentate dall'uomo in volo dipendono principalmente dalla depressione barometrica.

L'atmosfera si compone, fino ad una notevole altezza, di una miscela d'azoto N₂ (78,09%), ossigeno O₂ (20,95%), anidride carbonica CO₂ (0,03%), argon Ar (0,93%) e tracce d'idrogeno, neon, elio, cripton, etc. L'atmosfera esercita una pressione misurabile in mm di mercurio (mmHg) o in millibar (mbar). A livello del mare la pressione barometrica ha un valore medio di 760 mmHg o di 1013,3 mbar.

La pressione barometrica diminuisce con l'aumentare dell'altezza a causa della compressibilità dei gas, tale diminuzione non è rettilinea ma segue una curva logaritmica.

Anche la temperatura diminuisce con l'aumentare dell'altezza fino a circa 11 km, alle medie latitudini e il gradiente termico per ogni 100 m d'altezza è di 0,63°C.

L'atmosfera terrestre è stata suddivisa variamente in rapporto alla composizione e alle proprietà. Una delle più comuni ripartizioni si fonda sull'andamento della temperatura e considera i seguenti strati, i cui limiti non sono univocamente accettati.

Troposfera è la zona dell'atmosfera a temperatura decrescente. I suoi limiti superiori (tropopausa) sono a circa 11 km s.l.m. alle latitudini medie, a circa 18 km all'equatore e a circa 6 km ai poli.

Stratosfera è la zona dell'atmosfera a temperatura pressoché costante, al cui limite inferiore si hanno veloci correnti aeree (a getto); il limite superiore è denominato stratopausa.

Mesosfera è la zona dell'inversione termica: al suo

limite superiore (mesopausa) la temperatura è circa 100 °C sottozero.

Termosfera è la zona in cui la temperatura aumenta rapidamente con la quota; il limite superiore (termopausa) è intorno ai 500 km. Al di sopra si estende l'esosfera.

A causa delle variazioni di temperatura e di umidità, e per conseguenza a causa della variabilità dei movimenti atmosferici e d'altri numerosi fattori, la pressione atmosferica non presenta sempre gli stessi valori per uguali quote. Per eliminare tale inconveniente si è ricorso alla determinazione di un'atmosfera tipo, o standard, o internazionale, che rispecchia l'andamento medio dei valori delle varie pressioni barometriche e delle varie temperature osservabili alle stesse quote dell'atmosfera di una data zona della terra (TAB. 1).

Durante il volo eseguito in alta quota l'organismo viene sottoposto alla depressione barometrica. Gli effetti che ne conseguono sono di due ordini: effetti dipendenti dalla diminuzione della pressione parziale d'ossigeno (pO₂) atmosferico; effetti dipendenti dalla depressione atmosferica in toto.

EFFETTI DIPENDENTI DALLA DIMINUZIONE DELLA PRESSIONE PARZIALE DI OSSIGENO

L'ipossia viene definita come una deficienza di ossigeno a livello dei tessuti. Esistono parecchie cause potenziali di ipossia, ma, nel complesso, è possibile classificarle in quattro categorie generali:

- Ipossia ipossica: la pO₂ arteriosa risulta ridotta;

TAB. 1 ATMOSFERA TIPO O INTERNAZIONALE

Altezza in m s.l.m.	Pressione in mmHg	Temperatura in °C	Altezza in m s.l.m.	Pressione in mmHg	Temperatura in °C
0	760,0	+15,0	11.000	169,6	-56,5
1000	674,1	+8,5	12.000	144,9	-56,5
2000	596,2	+2,0	13.000	123,7	-56,5
3000	525,8	-4,5	14.000	105,7	-56,5
4000	462,3	-11,0	15.000	90,3	-56,5
5000	405,0	-17,5	16.000	77,1	-56,5
6000	353,7	-24,0	17.000	65,9	-56,5
7000	307,5	-30,5	18.000	56,2	-56,5
8000	266,9	-37,0	19.000	48,0	-56,5
9000	230,4	-43,5	20.000	41,0	-56,5
10.000	198,2	-50,0			

- Ipossia anemica: la pO₂ arteriosa è normale, ma il totale contenuto di ossigeno del sangue è ridotto per carenza di globuli rossi o di emoglobina.
- Ipossia ischemica: il difetto fondamentale è costituito da un troppo scarso flusso di sangue attraverso i tessuti (come, per esempio, nel caso dello shock).
- Ipossia istotossica: nella quale la quantità dell'ossigeno che raggiunge il tessuto è normale, ma le cellule di questo sono incapaci di utilizzarlo perché un agente tossico (per esempio il cianuro) interferisce con i congegni biochimici del metabolismo cellulare.

IPOSSIA IPOSSICA O IPOBARICA

Per comprendere il meccanismo di diffusione dell'O₂ e del suo trasporto è necessario accennare a delle piccole nozioni sul trasporto di questo.

Negli eritrociti è l'emoglobina (Hb), il pigmento rosso in essi contenuto, che trasporta l'ossigeno. Questa è un metallo (eme)-proteina (globina), l'eme contiene il ferro che lega prima con l'ossigeno e poi, cedendo questo, con l'anidride carbonica (CO₂).

Nell'organismo umano, il sistema deputato all'assimilazione ed al trasporto dell'O₂ è formato dal sistema respiratorio e dal sistema cardiovascolare.

L'apporto di O₂ ad un dato tessuto dipende dalla quantità di O₂ che entra nei polmoni, dall'adeguatezza dello scambio gassoso nei polmoni, tra alveoli e letto capillare, dall'afflusso sanguigno al tessuto e dalla capacità del sangue di trasportare O₂. La quantità di O₂ contenuta nel sangue è determinata dalla pressione parziale di O₂ a livello degli alveoli polmonari, dalla quantità di emoglobina presente nel sangue e dall'affinità dell'emoglobina per l'O₂.

Quando il sangue è in equilibrio con O₂ al 100% (PO₂=760 mmHg), l'emoglobina è satura al 100%: questo è ciò che accade quando il sangue passa nei polmoni e rilascia la CO₂ (curva di dissociazione dell'emoglobina) (TAB. 2).

Al crescere dell'altitudine, la composizione dell'aria rimane costante, ma la pressione barometrica diminuisce. Pertanto, anche la pressione alveolare dell'O₂ diminuisce. A 3.000 metri s.l.m., la pO₂ alveolare è di circa 60 mm Hg e si ha una stimolazione ipossica dei recettori, sufficiente a far aumentare la ventilazione. Ciò aumenta la profondità e il ritmo

degli atti respiratori. Salendo più in alto la pO₂ decresce più lentamente e la pCO₂ alveolare continua a diminuire. L'abbassamento della pCO₂ arteriosa, che ne risulta, determina un'alcalosi respiratoria (TAB. 3).

SINTOMI IPOSSICI

Quando l'uomo si trova ad una depressione barometrica di circa 525 mm Hg (pari a 3000 m d'altezza s.l.m.), la P O₂ alveolare è di 60 mmHg. In coincidenza con un tale valore di depressione s'instaura uno dei fenomeni respiratori più importanti: l'aumento della ventilazione polmonare. L'aumento della ventilazione può cominciare già a partire dai 1800 m s.l.m.; con un'esposizione a tale altitudine prolungata, diventa tanto più notevole quanto maggiore è la quota, fino a raggiungere valori doppi rispetto a quelli che si osservano a livello del mare. Generalmente il massimo stimolo alla ventilazione si raggiunge ad una quota di 7000 m. s.l.m. (300-250 mm Hg.) A questa quota il PO₂ alveolare presenta un valore di ca. 25-27 mmHg (TAB. 3).

Il volo in quota induce anche modificazioni della parte corpuscolata del sangue, la più evidente è un aumento del numero dei globuli rossi (poliglobulia da alta quota) che incomincia verso l'altezza di 3000 m s.l.m. (526 mmHg) e raggiunge, qualora l'ascensione in quota si faccia lentamente (150-200 m al minuto), valori del 60% superiori a quelli riscontrati prima della partenza, ad altezze di 7000-7500 m (308-287 mmHg).

È importante sapere che la poliglobulia da volo in alta quota NON dipende generalmente da neoformazione di elementi corpuscolari sanguigni (come accade dopo prolungato soggiorno in alta montagna) ma, da mobilitazione degli elementi corpuscolari sanguigni dagli organi (milza, fegato, capillari muscolari, ecc) dove questi ristagnano in deposito per far fronte alle varie richieste dell'organismo. Nell'ipossia ipossica si avrebbe soprattutto una spremitura di elementi sanguigni dalla milza.

Anche il sistema cardiocircolatorio subisce delle variazioni nell'aumento della gittata cardiaca e della frequenza che, quest'ultima aumenta già per valori di depressione barometrica corrispondenti a 3000-4000 m s.l.m. e raggiunge a 7000-8000 m s.l.m. cifre del 90% superiori a quelle riscontrate prima dell'ini-

TAB. 2 PRESSIONI PARZIALI DEI GAS RESPIRATORI

Gas	Aria atmosferica		Aria alveolare		Sangue arterioso	Sangue venoso
	%	mm Hg	%	mm Hg	mm Hg	mm Hg
O ₂	20,94	159,1	14,2	101	100	40
CO ₂	0,04	0,3	5,5	39	40	46
N ₂	79,02	600,6	80,3	573	573	573
Totale	100,00	760,0	100,0	713	713	659

TAB.3 VALORI DI TENSIONE DEI GAS ALVEOLARI (pAO₂ E pACO₂) E DEL QUOZIENTE RESPIRATORIO (Q.R.) A VARIE ALTEZZE.

Altezza in m.	Press. Barom. in mmHg	pACO ₂	pAO ₂	Q.R.
0	760	36,7	102,3	0,889
1220	665	38,5	84,8	0,902
2150	590	40,0	67,0	0,871
3250	495	36,8	53,3	0,827
4270	445	35,4	44,0	0,894
5180	405	30,7	38,1	0,882
6100	350	29,4	35,3	1,054
7000	307	29,0	30,0	1,189
7660	270	23,5	32,5	1,407

zio del volo. Aumentando ancora l'altezza (8500-9000 m s.l.m.) si ha un arresto del cuore.

MALATTIA DA DECOMPRESSIONE (DCS - DECOMPRESSION SICKNESS)

Alla pressione di 760 mmHg, la quantità di azoto (N₂) in soluzione (in massima parte nei tessuti, ed

in particolare in quelli ricchi di lipidi, nei quali la sua solubilità è 6 volte superiore a quella nell'acqua) nell'organismo di un uomo è di circa 1 litro.

Se la pressione parziale dell'azoto diminuisce a livello alveolare, il gas che giunge sciolto nel sangue ai polmoni si diffonde attraverso la parete alveolo capillare e viene eliminato progressivamente, pro-

porzionalmente alla diminuzione della sua pressione nell'aria alveolare.

Se invece diminuisce con rapidità anche la pressione barometrica, la liberazione dell'azoto dai liquidi e dai tessuti avviene tumultuosamente (fenomeno dell'effervescenza), con formazione di bollicine di gas che si accumulano negli spazi extravascolari e penetrano nei capillari.

La formazione di bolle di N₂ nell'organismo è un processo molto complesso, per il quale necessitano la preesistenza di nuclei gassosi (anche di altri gas: CO₂), e uno stato di soprasaturazione dell'azoto a causa della brusca diminuzione della pressione parziale: il gas è allora in equilibrio instabile ed è sufficiente una diminuzione della pressione barometrica a farlo versare nei nuclei gassosi, che s'ingrandiscono fino a formare bolle di varie dimensioni.

Nell'uomo, la sindrome può comparire in seguito ad ascensioni molto rapide, oltre i 5500 m (380 mmHg), ma di solito essa si presenta oltre i 6500 m. I disturbi iniziano dopo almeno 10-15 minuti di permanenza a quella quota (la latenza può essere più breve per altitudini superiori), con un massimo fra 20 e 40 minuti. Se non sono comparsi prima, è molto difficile che si manifestino dopo 2 ore di decompressione.

Nella decompression sickness si presentano sintomi e segni cutanei, articolari e neurosensoriali che possono seguirsi o sovrapporsi l'un l'altro.

Le manifestazioni cutanee consistono in parestesie (crio e termoparestesie), prurito, chiazze eritematose.

Quelle articolari e periarticolari, "bends", sono le più frequenti e consistono in dolori non bene localizzabili, lievi all'inizio, che possono divenire lancinanti e intollerabili tanto da impedire ogni attività. Sono più colpite le articolazioni maggiormente attive tipo l'anca, il ginocchio e la caviglia (83%), la spalla, il gomito e il polso (17%).

L'interessamento del sistema vascolare può causare serie difficoltà respiratorie, "the chokes", fino al completo collasso cardio-vascolare.

Le manifestazioni nervose e sensoriali sono di diverso tipo: transitorie e di tipo focale, (disturbi visivi) quali scotomi, emianopsie; dolori di tipo nevritico, paresi ed emiparesi, afasia, paralisi motorie, disturbi dell'equilibrio, contrazioni muscolari.

Fattori favorenti: oltre che dai fattori già ricordati (velocità ascensionale superiore ai 1000 m/min e quote elevate, permanenza protratta in quota) la comparsa della sindrome è favorita dal lavoro muscolare, è meno rara negli adulti e anziani rispetto ai giovani, si osserva con maggiore frequenza e gravità nei soggetti con abbondante tessuto adiposo.

Per eliminare il rischio della decompression sickness, i tessuti devono essere de-azotati con preossigenazione e successivamente equilibrata in un ambiente a bassa pressione.

Preossigenazione: a causa dell'alto tasso di consumo di ossigeno da parte dei tessuti, questo gas anche se in eccesso non contribuisce alla formazione o crescita di bolle nei tessuti stessi.

Respirando O₂ al 100% per un periodo di 4 ore e senza interruzioni si è visto che questo procedimento riesce ad eliminare l'azoto disciolto nell'organismo e diminuire molto il rischio della malattia da decompressione.

EFFETTI DIPENDENTI DALLA DEPRESSIONE ATMOSFERICA

La prima evenienza si presenta a carico dei seni frontali e mascellari, specialmente quando, in seguito a fatti infiammatori, gli sbocchi di dette cavità siano occlusi, e l'effetto della depressione si presenta con molta frequenza a carico dell'orecchio medio.

Lesioni dell'orecchio medio da barotrauma (aerotite media)

Tra i disturbi più frequenti che occorrono durante le ascensioni in quota e nelle discese, vanno annoverati quelli dell'apparato auricolare.

Tali disturbi si risolvono in linea di massima in dolori, ipoacusie, vertigini e si esplicano facilmente tenendo presente la costituzione anatomica dell'orecchio medio. Questo comunica mediante la tromba di Eustachio con il faringe. La tuba è un cono in parte osseo e in parte membranoso, il cui apice fa capo alla cassa del timpano e la base si apre nel faringe.

La perfetta pervietà della tromba di Eustachio permette il passaggio dell'aria dal faringe nell'orecchio medio e viceversa, facendo così in modo di mettere in equilibrio la pressione contenuta nella cassa del timpano con la pressione ambientale.

Tale comunicazione può venire però impedita o resa difficoltosa da fenomeni flogistici (con edema, secrezione mucosa o catarrale) e portare come ulteriore conseguenza dai disturbi suddetti, sino alla rottura della membrana timpanica.

In condizioni normali si possono considerare due modificazioni a carico dell'orecchio medio:

ASCESA: diminuzione di pressione

- positivizzazione della pressione nell'orecchio medio,
- estroflessione della membrana timpanica.

Quando la pressione all'interno dell'orecchio medio raggiunge i 15-20 mmHg si ha l'apertura dell'ostio tubarico con fuoriuscita d'aria nel faringe ed equiparazione delle pressioni.

DISCESA: aumento di pressione

- negativizzazione della pressione nell'orecchio medio,
- introflessione della membrana timpanica.

Tecnica

Fornire ossigeno, migliorare l'autonomia, controllare l'ossigenazione

Gli impianti per fornire ossigeno al pilota esistono ormai da lungo tempo. Negli ultimi dieci anni sono apparsi due nuovi sistemi, prodotti da varie ditte, accomunati solo dall'obiettivo di ottimizzare il consumo di ossigeno aumentando la scarsa autonomia delle bombole portatili.

Il metodo più diffuso è quello basato su una centralina elettronica che gestisce la quantità di ossigeno in funzione del ritmo respiratorio del pilota, e soprattutto della quota. L'impianto EDS-1, molto affidabile e utilizzato in tutto il mondo, invia l'ossigeno per un breve momento all'inizio di ogni atto respiratorio; l'autonomia, tra i 3000 e i 4500 metri, è moltiplicata per molte volte. I timori di guasto alla centralina sono poco giustificabili: la casistica è molto limitata (legata in gran parte all'esaurimento della pila alcalina da 9V, è ragionevole portarne una di scorta), e in ogni caso la centralina si apre al flusso continuo scongiurando il rischio di ipossia (almeno fino all'esaurimento della bombola).

Un metodo molto più semplice è basato invece sulla cannula nasale "Oxysaver" che incorpora un piccolo serbatoio dell'ossigeno: il flusso in uscita dal regolatore meccanico a vite è costante ma ridottissimo; l'ossigeno va a riempire la membrana nella cannula, e l'inalazione avviene tutta insieme con l'atto respiratorio del pilota. Il risparmio nel consumo di ossigeno si avvicina a quello ottenuto con la centralina, ad un costo ben più contenuto, ma il sistema è fisicamente molto delicato: facile danneggiarlo negli spostamenti e ancor più facile rompere il regolatore del flusso che è realizzato in materiale plastico (e incorpora una pallina per indicare il flusso e la quota di regolazione manuale).

L'ultima novità è invece rappresentata dai nuovi piccolissimi apparecchi che permettono di misurare istantaneamente la quantità di ossigeno nel sangue: l'Oxymeter Nonin ne è un esempio. Questi misuratori devono servirci solo per una verifica dello stato di ossigenazione, risolvendo qualche inquietante dubbio del pilota, ma non possono far passare in secondo piano l'importanza di un buon impianto per l'ossigeno.

Aldo Cernezi



A questo punto non si avrà però una spontanea apertura della tromba nel faringe poiché la pressione che si esercita sui tessuti molli tubarici e paratubarici determina un "incollamento" delle pareti. Perché avvenga l'apertura è necessario che si verifichino movimenti volontari: deglutizione, sbadiglio, manovra di Valsalva, che mettono in azione i muscoli dilatatori tubarici.

In caso di discese rapide con forti differenze di pressione, l'orifizio faringeo della tromba si blocca in chiusura con impossibilità, per l'intensità della pressione di azionare anche volontariamente i muscoli faringei. È a questo punto che, se la variazione positiva prosegue, per l'intensa distensione del timpano si può stabilire la cosiddetta aerotite traumatica i cui aspetti anatomo-patologici vanno dalla semplice iperemia della membrana, all'ematoma intralamellare, fino alla rottura della membrana timpanica.

Disfunzione del tubo gastro-enterico

I gas intestinali sono costituiti per la maggior parte di azoto ed in minore misura da CO₂ e O₂; si riscontrano inoltre le proporzioni variabili secondo il regime alimentare, di gas putrefattivi quali il metano, l'idrogeno solforato, l'indolo, lo scatolo, ecc.

Il volume dei gas contenuti nel tubo gastro-enterico aumenta con il progredire della quota raggiunta (legge di Boyle e Mariotte: a temperatura costante il volume occupato da un gas varia in ragione inversamente proporzionale alla pressione ($V=K1 \ 1/P$, dove V =volume del gas, $K1$ =una costante, P =pressione) se ne deduce che diminuendo la pressione cui questi gas intestinali sono posti aumenta il volume dell'ansa intestinale).

La distensione dei visceri, provocata da questo aumento di volume, crea una serie di disturbi che vanno da uno stato di tensione addominale fino ad un quadro doloroso molto intenso.

Tali nevralgie che sono talvolta localizzate all'epigastrio, talora all'ipogastrio e che possono essere diffuse a tutti i quadranti addominali, sono spesso accompagnate da reazioni vasomotorie come pallore o rossore, sudorazione, vertigini e più raramente, nausea, vomito e perdita di coscienza.

Vi sono alcuni fattori che influenzano indiscutibilmente i disturbi gastro-enterici da alta quota e che si possono suddividere in fattori dipendenti dal volo ed in fattori organici.

Fattori dipendenti dal volo:

- Quota: la quantità dei disturbi addominali aumenta con il progredire dell'altezza. La reazione ha un andamento lineare.
- Velocità di ascensione: il rapporto è simile al precedente, anche se la relazione non è così stretta.

Fattori organici:

- Età: leggero aumento dei disturbi con l'età.
- Sedi anatomiche: le sedi particolarmente sensibi-

li alla dilatazione sono: duodeno, parte distale dell'ileo, digiuno, colon discendente.

- Regime alimentare: vi sono alimenti che aumentano l'incidenza dei disturbi gastro-enterici da alta quota ad es. alimenti che danno eccessive fermentazioni (pasti ricchi di glucidi e cellulosa, birra, acqua gassata, ecc.). Alimenti irritanti la mucosa gastro-enterica (spezie alimentari).
- Abitudini al volo: nelle persone abituate al volo l'incidenza dei disturbi addominali è meno frequente.
- Pazienti affetti da disfunzioni o malattie gastro-intestinali: tali soggetti accusano in maggior misura disturbi addominali. Nei portatori di ernie (inguinali, diaframmatiche, ecc.), nei portatori di appendicite cronica, nei colestomizzati. Anche i portatori di gastro-enteriti, stipsi cronica hanno incidenza maggiore di disturbi.

Il dolore che si può scatenare nei portatori di questi disturbi ha un andamento quanto mai irregolare, infatti può iniziare durante l'ascesa o dopo che sia stata raggiunta la massima quota. Cessano durante la discesa o dopo la loro emissione per vie naturali, comunque il dolore può a volte persistere come sparire spontaneamente.

CONCLUSIONI

Da quanto detto i piloti devono tener presente che: Se vogliono raggiungere una certa quota, non necessariamente alta (3000 m s.l.m.), è consigliabile l'uso dell'ossigeno, onde evitare l'ipossia ipobarica.

Soggetti allenati alle quote possono resistere ed eseguire una certa attività psicofisica, quando nei loro alveoli polmonari si abbia una pressione dei gas alveolari (PO₂ e PCO₂) equivalente a 45-50 mmHg. Al di sotto di questi valori si determina una depressione funzionale dei centri respiratori alla quale può seguire la paralisi dei centri stessi e quindi la morte. Una pressione dei gas alveolari equivalenti a 45-50 mmHg si ha quando l'organismo si trova ad un'altezza di 7500-8000 m (pressione barometrica 286-267 mmHg). Respirando O₂ puro l'altezza massima raggiungibile aumenta notevolmente.

Per quanto riguarda la malattia da decompressione non c'è nessuna altitudine che possa essere considerata una soglia sotto cui può essere assicurato che nessuno svilupperà la decompression sickness (DCS).

L'uso di alcol aumenta il rischio della DCS.

Ricordare che utilizzare ossigeno al 100% SOLO in volo non eviterà la DCS, ed è obbligatorio eseguire una pre-ossigenazione di 30-40 minuti prima di iniziare il volo.

**VOLO
A
VELA** 