

# Fisiologia della Respirazione

Scambi gassosi-ventilazione  
vent/perf

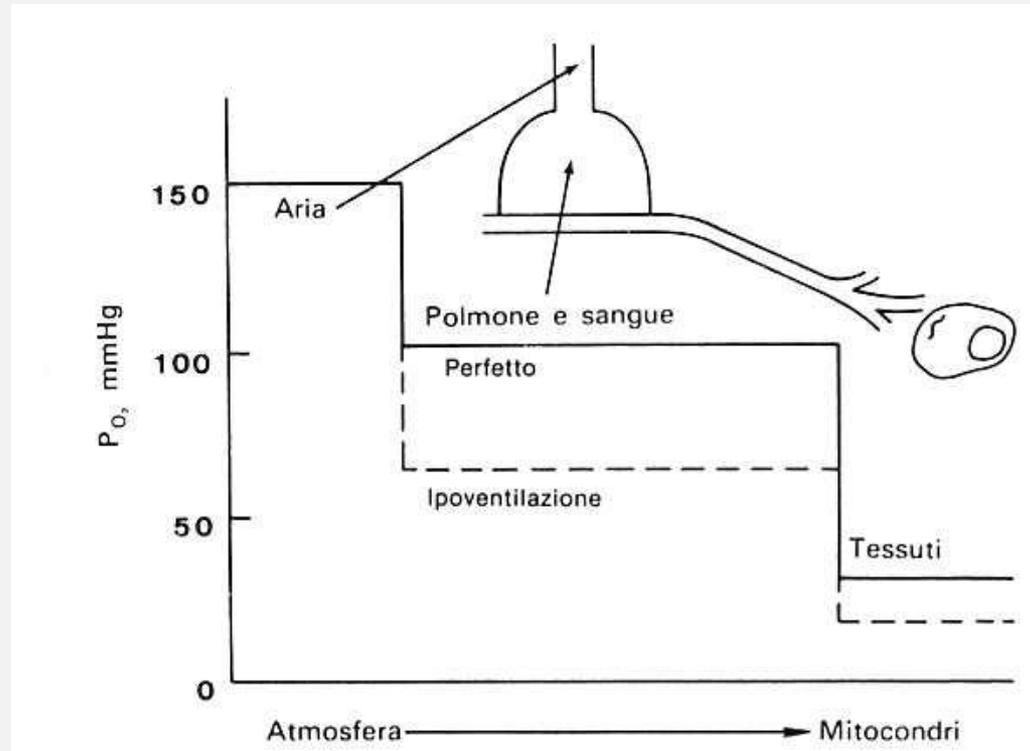
FGE aa.2016-17

# Obiettivi

- Studio delle relazioni quantitative tra ventilazione, flusso di sangue nei polmoni, composizione dell'aria ambiente,  $V' O_2$ ,  $V' CO_2$  e composizione dell'aria alveolare e loro influenza sugli scambi respiratori
- La cascata dell'  $O_2$
- Calcolo di  $V' O_2$  e  $V' CO_2$ , RR
- La ventilazione alveolare determina la composizione dell'aria alveolare
- Equazione dell'aria alveolare
- Distribuzione zonale della ventilazione e della perfusione nel polmone
- Rapporto  $V'_A/Q'$  nei distretti polmonari
- Rapporto  $V'_A/Q'$  e scambi gassosi: RR e pressioni parziali di  $O_2$  e  $CO_2$  distrettuali
- La disomogeneità del rapporto  $V'_A/Q'$  come causa di ipossiemia
- Shunt veno-arterioso
- Spazio morto alveolare e spazio morto fisiologico

# Il trasporto dell'O<sub>2</sub>

- La cascata dell'O<sub>2</sub>
- La P<sub>a</sub>O<sub>2</sub> deve rimanere entro determinati limiti
- Cause di ipossiemia
- Ipoventilazione alveolare (*disturbi del centro ventilatorio, aumento dello spazio morto, etc.etc*) causa la diminuzione della P<sub>A</sub>O<sub>2</sub> e della P<sub>a</sub>O<sub>2</sub>
- Ipodiffusione
- Shunt veno-arterioso
- Maldistribuzione del rapporto V'/Q'



# $V'O_2$ e $V'CO_2$

$$\dot{V}O_2 = \dot{V}_I F_{IO_2} - \dot{V}_E F_{EO_2}$$

$$\dot{V}CO_2 = \dot{V}_E F_{ECO_2} - \dot{V}_I F_{ICO_2} = \dot{V}_E F_{ECO_2} - 0$$

$$\dot{V}N_2 = \dot{V}_I F_{IN_2} - \dot{V}_E F_{EN_2} = 0$$

$$\dot{V}_I F_{IN_2} = \dot{V}_E F_{EN_2}$$

$$\dot{V}_I = \dot{V}_E \frac{F_{EN_2}}{F_{IN_2}}$$

$$\dot{V}O_2 = \dot{V}_E \frac{F_{EN_2}}{F_{IN_2}} F_{IO_2} - \dot{V}_E F_{EO_2}$$

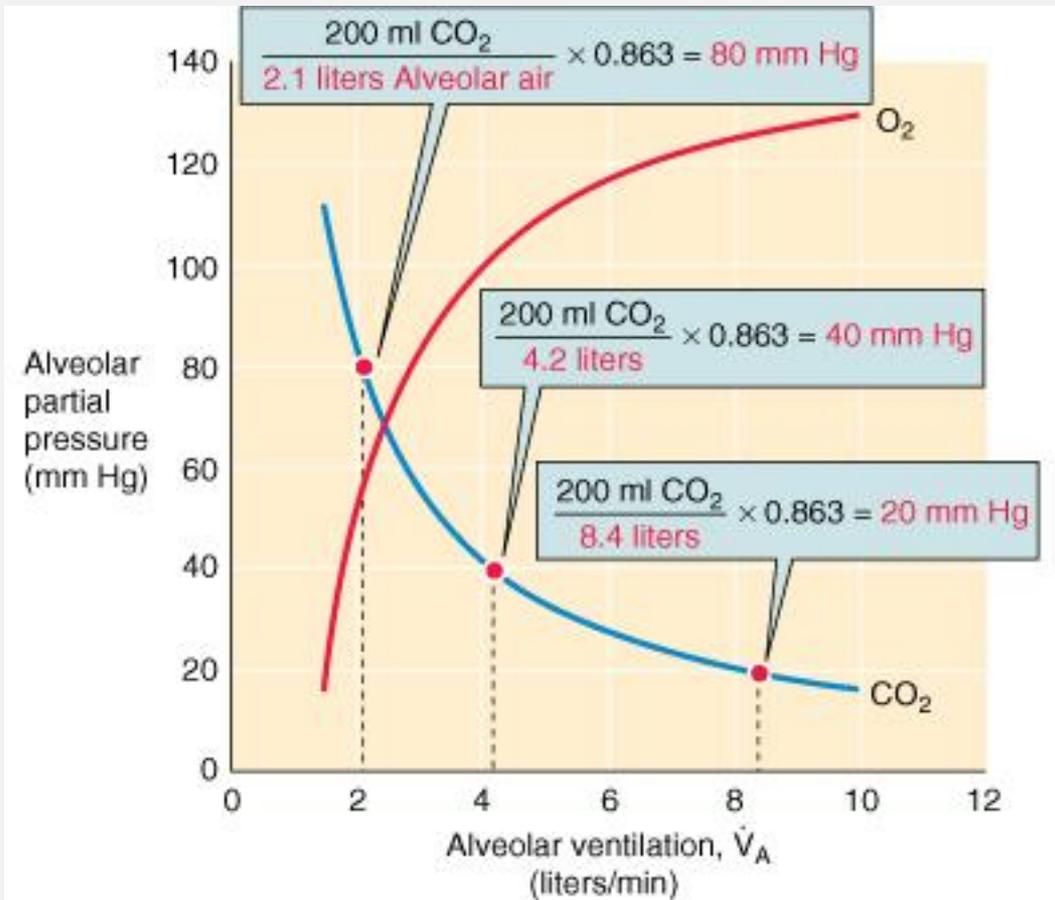
$$\dot{V}O_2 = \dot{V}_E \left( \frac{F_{EN_2}}{F_{IN_2}} F_{IO_2} - F_{EO_2} \right)$$

# Rapporto di scambio respiratorio (RR)

$$R = \frac{\dot{V}CO_2}{\dot{V}O_2}$$

$$R = \frac{F_E CO_2}{F_I O_2 \frac{F_E N_2}{F_i N_2} - F_E O_2}$$

# $V'_A$ e composizione dell'aria alveolare



- $F_A CO_2 / P_A CO_2$  sono inversamente proporzionali a  $V'_A$
- $F_A O_2 / P_A O_2$  tendono a  $F_I O_2 / P_I O_2$  per  $V'_A$  che tende all'infinito
- Le relazioni tra  $F_A CO_2$ ,  $F_A O_2$  e  $V'_A$  possono essere descritte in termini quantitativi tenendo in debito conto il metabolismo ( $V'O_2$ ,  $V'CO_2$ )

A: componente alveolare; si misura determinando la frazione del gas al termine di una espirazione forzata (Haldane-Priestley). Si può anche indicare con il pedice ET (end tidal) o E' o ac

# Ventilazione alveolare equazione dell'aria alveolare per la $PCO_2$

- Produzione di  $CO_2$  divisa per la frazione molare (in volume) di  $CO_2$  dell'aria alveolare

$$\dot{V}_A^{STPD} = \frac{\dot{V}CO_2^{STPD}}{F_A CO_2}$$

$$\dot{V}_A^{STPD} = \frac{\dot{V}CO_2^{STPD}}{\frac{P_A CO_2}{(P_B - 47)}}$$

# Ventilazione alveolare equazione dell'aria alveolare per la $PCO_2$

$$\dot{V}_A^{STPD} \cdot \frac{P_A CO_2}{(P_B - 47)} = \dot{V}CO_2^{STPD}$$

$$\dot{V}CO_2^{STPD} = \dot{V}_A^{BTSPS} \frac{P_A CO_2}{(P_B - 47)} \frac{273}{310} \frac{P_B}{760} \frac{(P_B - 47)}{P_B}$$

$$P_A CO_2 = 0.863 \frac{\dot{V}CO_2^{STPD}}{\dot{V}_A^{BTSPS}}$$

(mm HG · litri/ml)

$$\dot{V}_A^{BTSPS} = 0.863 \frac{200 \text{ ml/min}}{40 \text{ mm Hg}} = 4315 \text{ ml/min}$$

# Equazione dell'aria alveolare

- Le relazioni tra  $V'_A$ ,  $F_A CO_2$  ( $P_A CO_2$ ) e  $F_A O_2$  ( $P_A O_2$ ) possono essere **descritte in modo quantitativo**
- Ciò significa: i) descrivere la cosiddetta **equazione dell'aria alveolare**; ii) quindi, descrivere sul **diagramma  $P_A CO_2 - P_A O_2$**  le relazioni tra le pressioni parziali dei due gas in funzione di  $V'_A$

**Poniamo:**

- $V_A$ : volume di aria umida che **entra** negli alveoli ad ogni inspirazione
- $V_A CO_2$ : ml di  $CO_2$  (saturato di vapor d'acqua) **aggiunto a  $V_A$**  nei polmoni
- $V_A O_2$ : ml di  $O_2$  (saturato di vapor d'acqua) **sottratto a  $V_A$**  nei polmoni
- $F_A$ : frazione molare dei gas negli alveoli
- $F_I$ : frazione molare dei gas inspirati ( $F_I O_2 = 0.2093$ ;  $F_I CO_2 = 0.0003$ )
- $R$ :  $V_A CO_2 / V_A O_2$  quoziente respiratorio (*respiratory ratio*)

# Equazione dell'aria alveolare

Per la  $CO_2$

$$P_A CO_2 = 0.863 \frac{\dot{V}CO_2^{STPD}}{\dot{V}_A^{BTSP}}$$

Per l' $O_2$

$$P_A O_2 = P_I O_2 - P_A CO_2 / R$$

(Equazione dell'aria alveolare dell'  $O_2$ )

- Se  $R = 1$  (o  $F_I O_2 = 1$ )

$$P_A CO_2 = P_I O_2 - P_A O_2$$

# Gli scambi gassosi al lato capillare- Equazioni iso-R del sangue

$$\dot{V}_{O_2} = \dot{Q}_a^A C_{aO_2}^A - \dot{Q}_a^A C_{\bar{v}O_2} = \dot{Q}_a^A (C_{aO_2}^A - C_{\bar{v}O_2})$$

$$\dot{V}_{CO_2} = \dot{Q}_a^A C_{\bar{v}CO_2}^A - \dot{Q}_a^A C_{aCO_2}^A = \dot{Q}_a^A (C_{\bar{v}CO_2}^A - C_{aCO_2}^A)$$

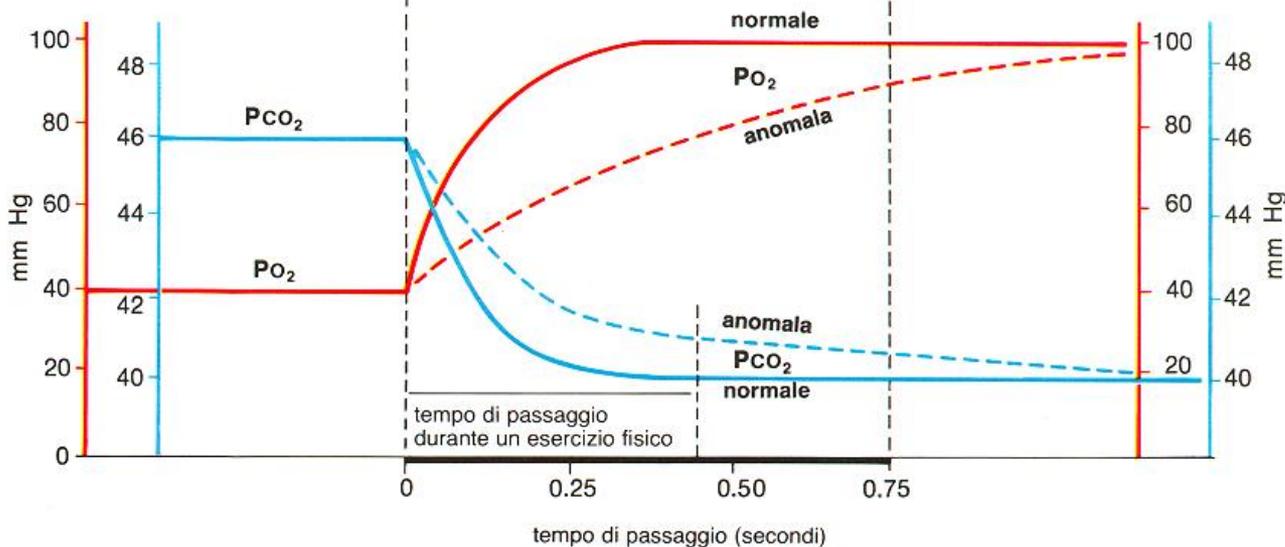
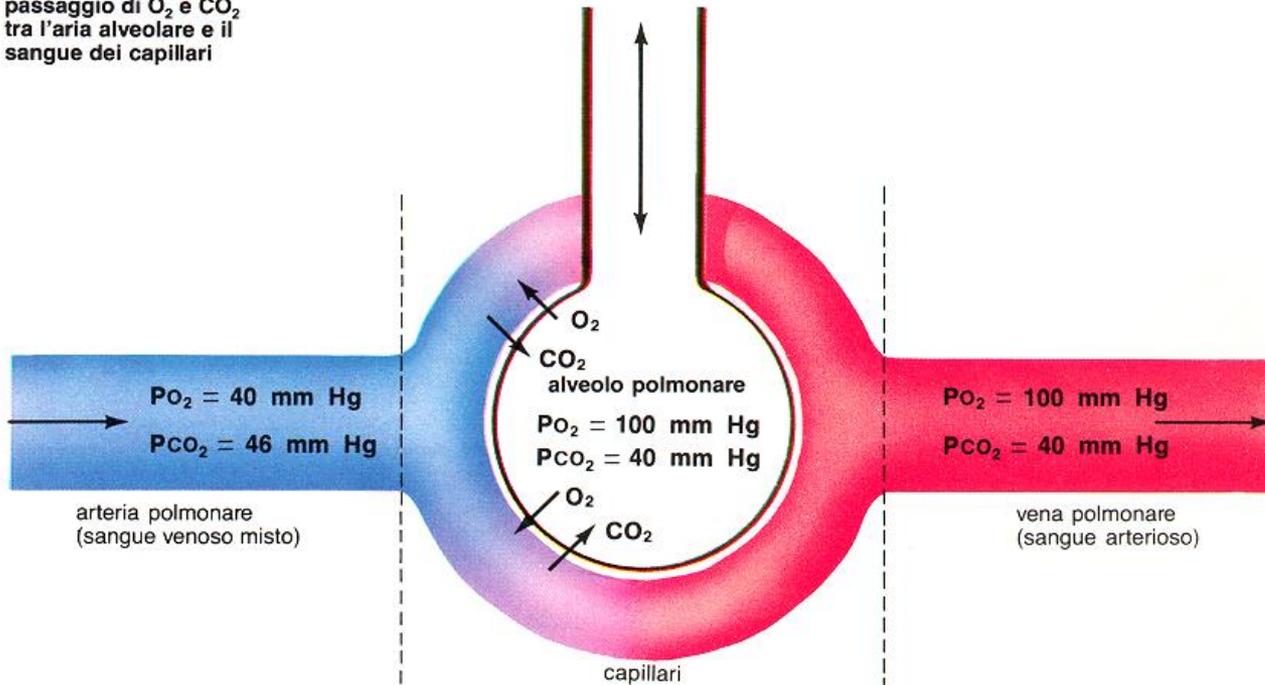
$$R = \frac{C_{\bar{v}CO_2}^A - C_{aCO_2}^A}{C_{aO_2}^A - C_{\bar{v}O_2}}$$

# Pressioni parziali dei gas al termine dei capillari e negli alveoli

1. Nel corso del tragitto lungo il capillare, le pressioni parziali di  $O_2$  e  $CO_2$  del sangue si equilibrano con quelle alveolari
2. Le pressioni parziali dei gas al termine del capillare polmonare **sono quindi in equilibrio** con quelle degli alveoli corrispondenti in tutti i distretti polmonari
3. L'R per il sangue deve essere uguale a quella dell'aria alveolare

# Press. Parziali estremo venoso e arterioso

passaggio di  $O_2$  e  $CO_2$   
tra l'aria alveolare e il  
sangue dei capillari



l'equilibrio alveolo-capillare delle pressioni parziali, costituendo ciò un fattore di sicurezza per gli scambi.

# $P_{AO_2}$ , $P_{ACO_2}$ e $V'_A/Q'$

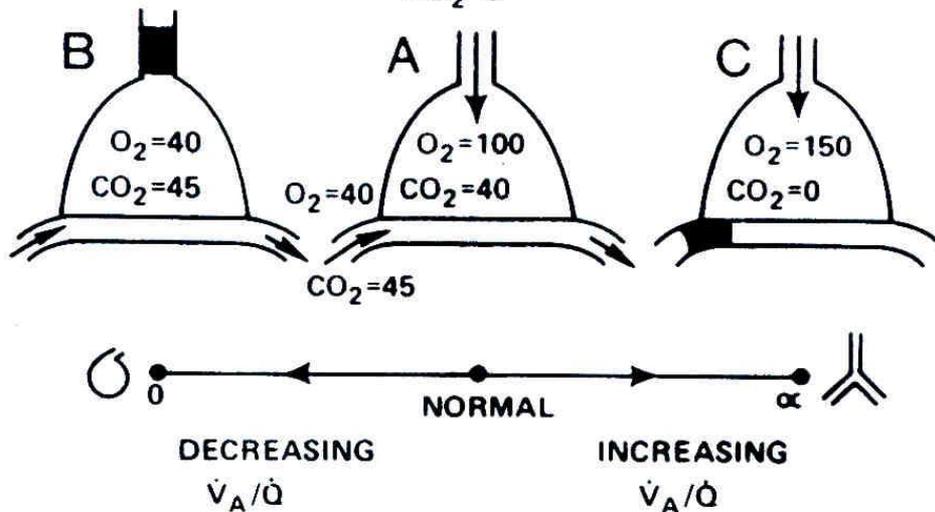
## Ventilation - Perfusion Inequality

- Alveolar  $PO_2$  depends on the balance of alveolar ventilation - fresh gas flow - and  $O_2$  removal by the circulation.

Consider 0 Normal and  $\dot{V}_A/\dot{Q} \rightarrow \infty$

$O_2 = 150 \text{ mmHg}$   
 $CO_2 = 0$

Figure 5.6.

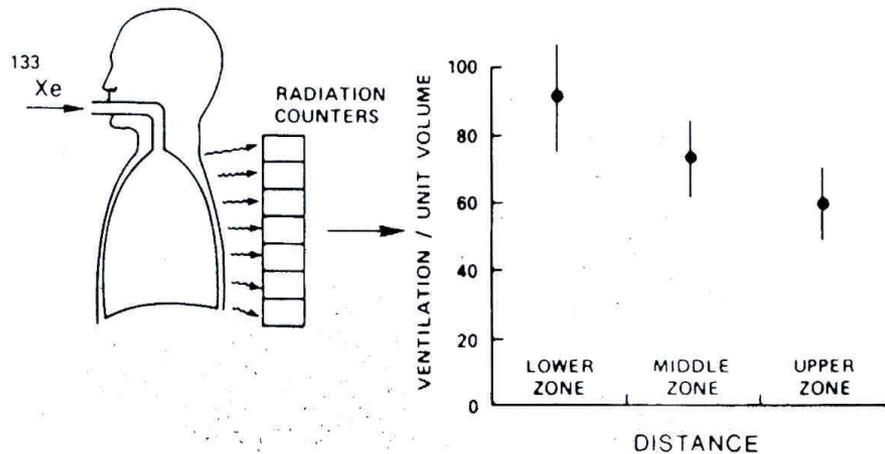


- In realtà, nel polmone i valori di  $V'_A/Q'$  sono distribuiti secondo un *continuum* di valori
- Abbiamo, cioè, una vera e propria curva di distribuzione dei valori di  $V'_A/Q'$  tra due estremi che corrispondono ad uno spazio morto (alveolare) e ad uno shunt
- La distribuzione del rapporto  $V'_A/Q'$  può essere disomogenea in un polmone patologico; estese zone con  $V'_A/Q'$  vicino a 0 o infinito

# Rapporto $V'_A/Q'$

Distribuzione regionale della ventilazione

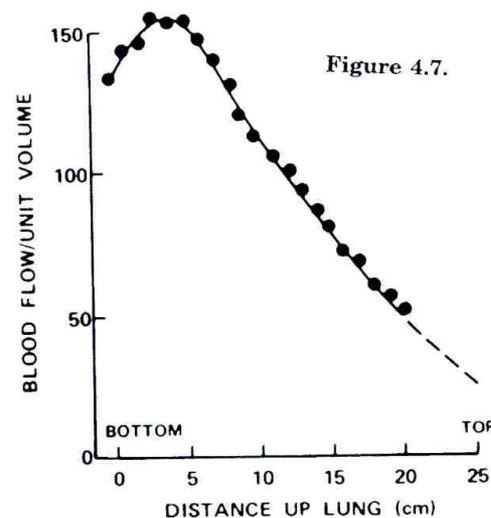
- L'aria inspirata non si distribuisce uniformemente nelle varie parti del polmone;
- La ventilazione per unità di volume polmonare è maggiore nelle parti inferiori e minore in quelle superiori



- Distribuzione regionale della perfusione polmonare

Where is the blood distributed?

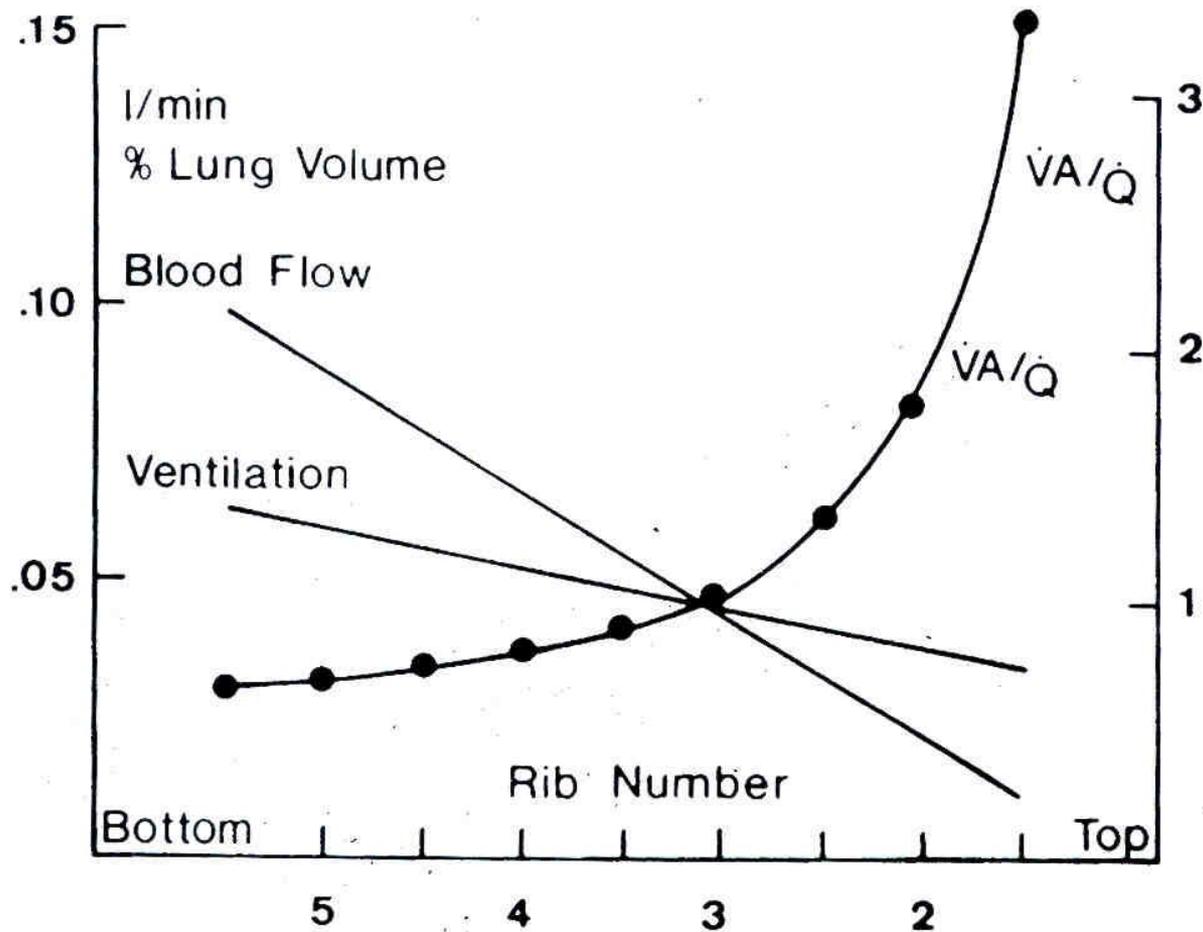
- Gravity plays a role.



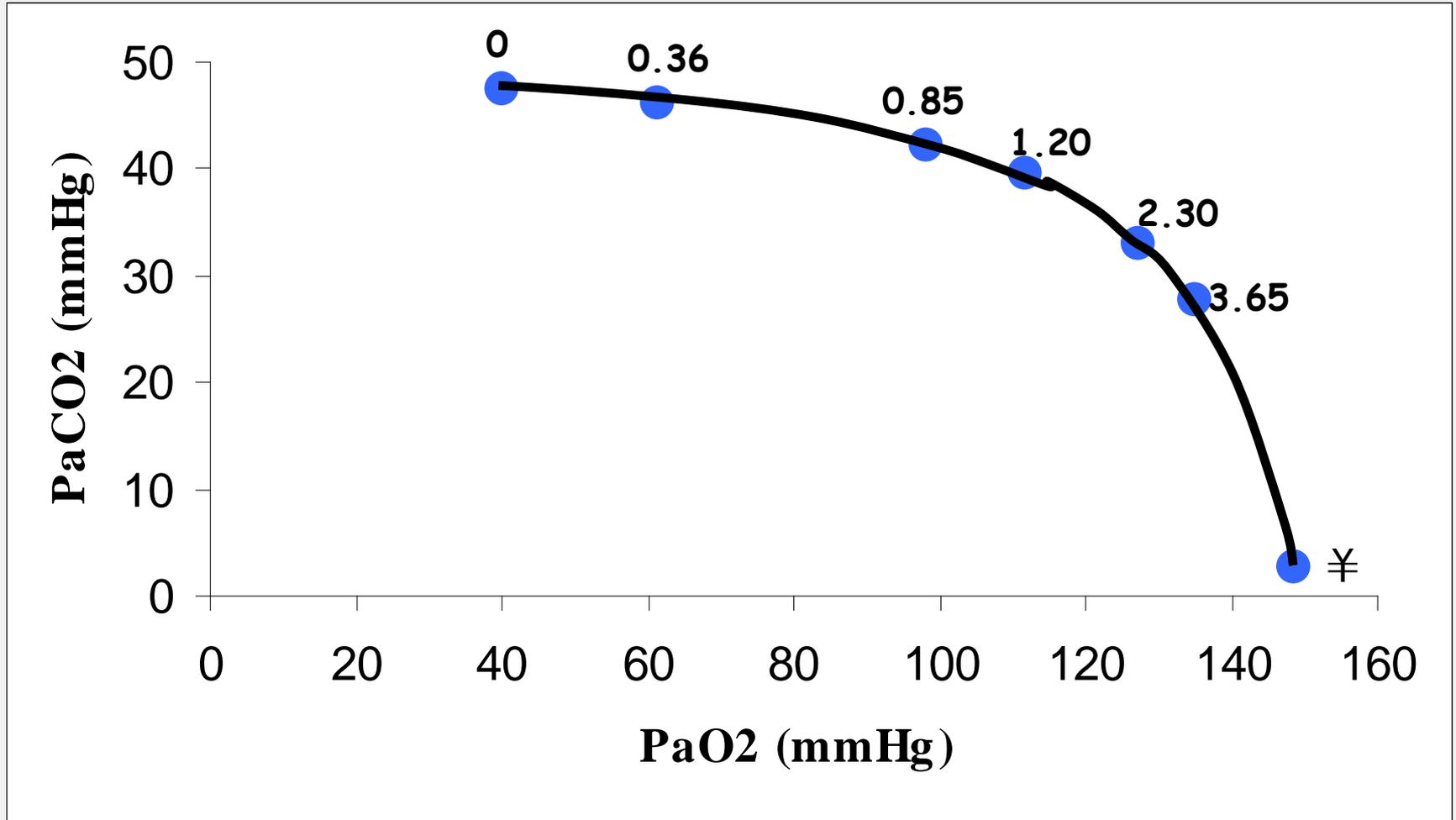
- Pulmonary pressures must pump blood up from the heart to the top of the lung.
- The top to bottom difference in vascular pressures would be approx. 20+ mmHg.

# Rapporto $\dot{V}'_A/\dot{Q}'$

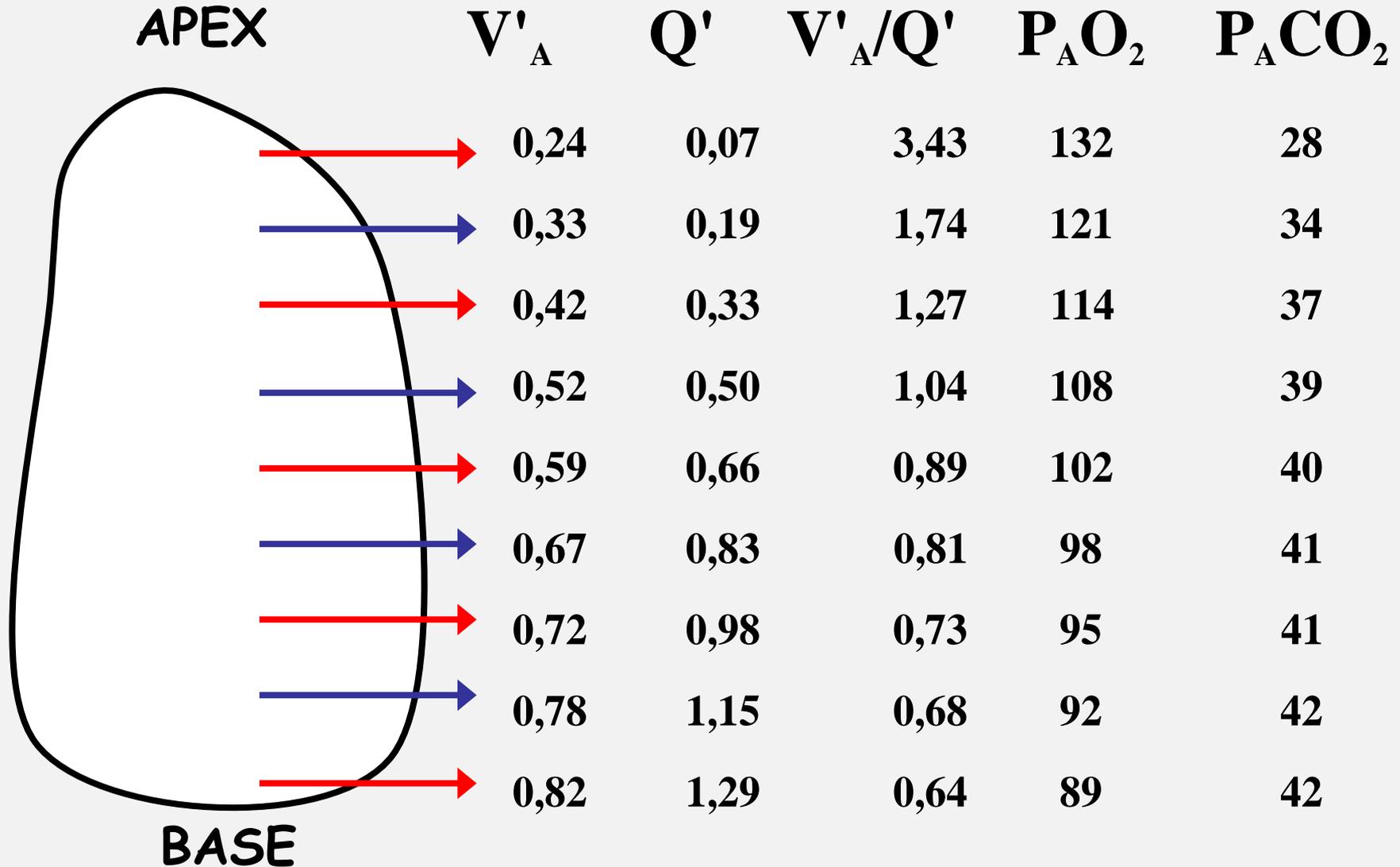
- Note Apex to base distributions of  $\dot{V}$ ,  $\dot{Q}$  and  $\dot{V}/\dot{Q}$  ratios.



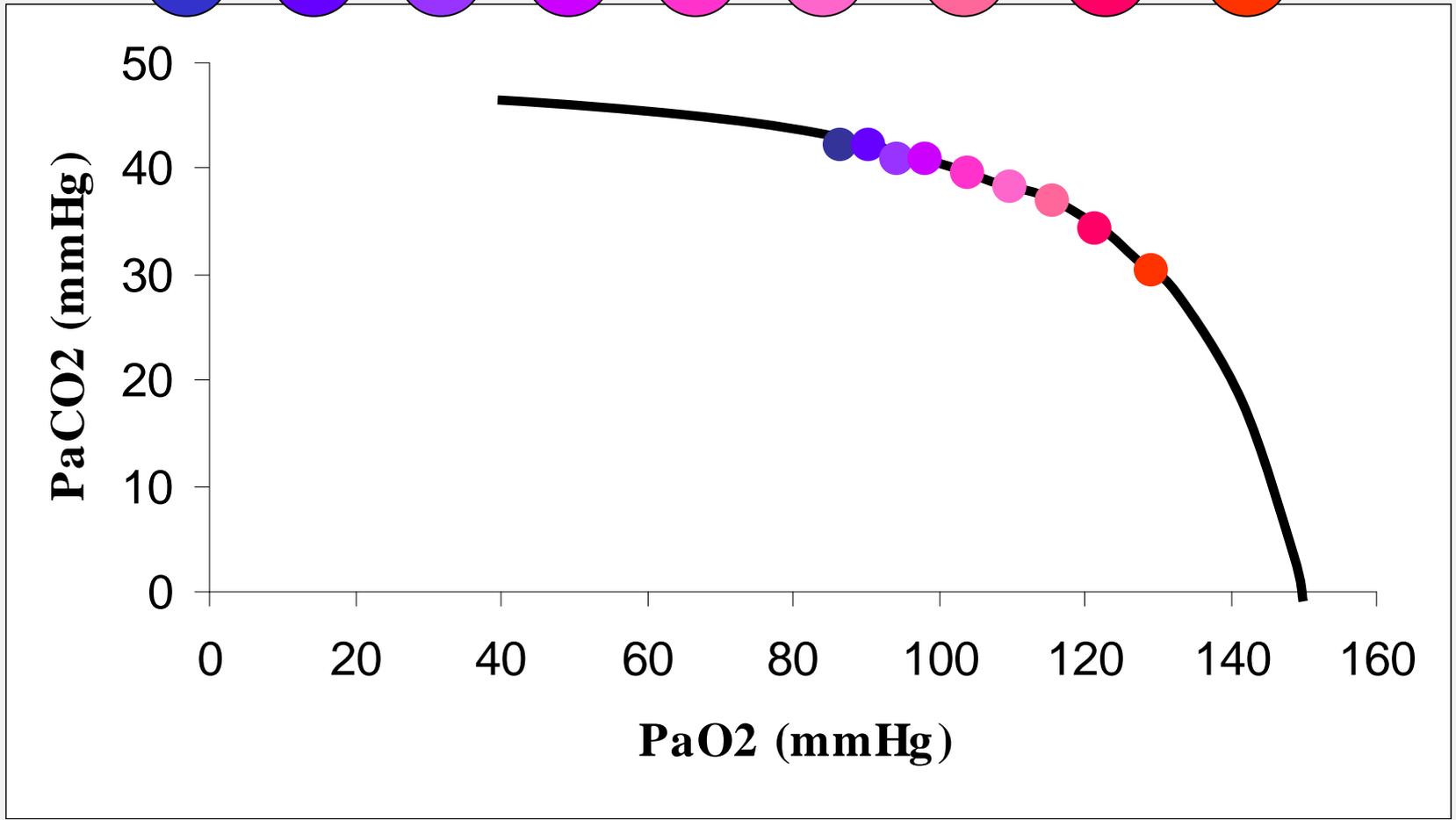
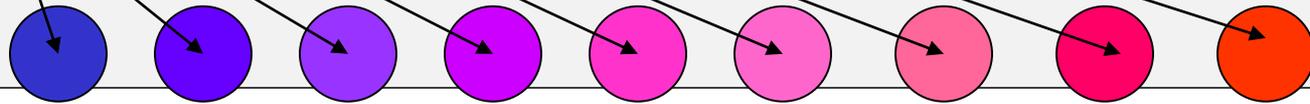
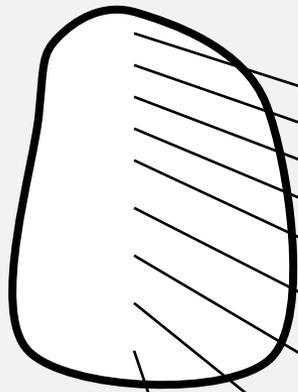
# Rapporto vent/perf aria e sangue



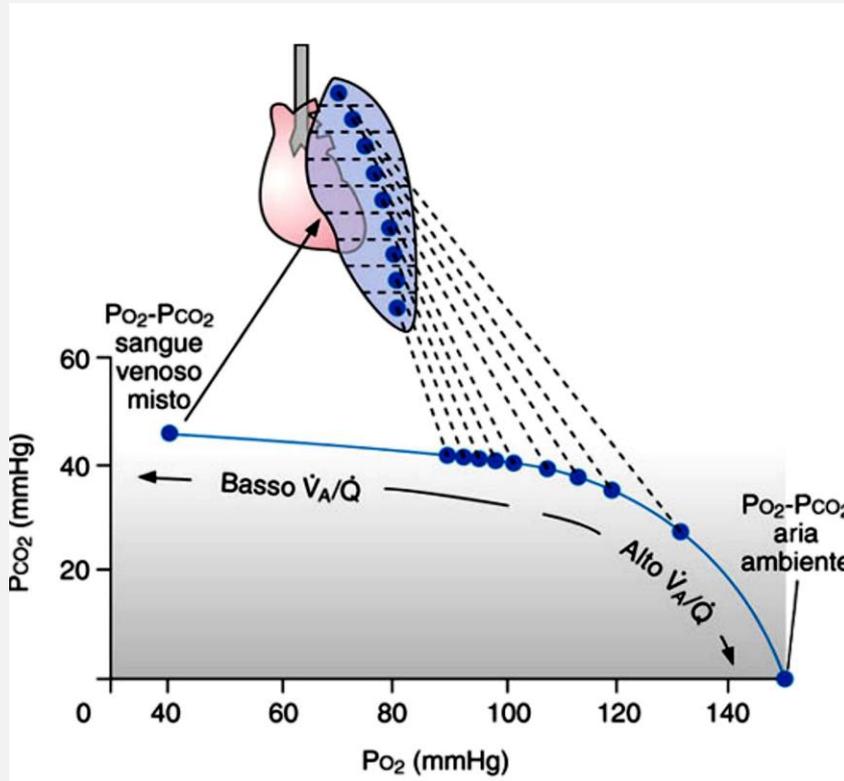
# Distribuzione di $V'_A/Q'$ , $P_{A}O_2$ e $P_{A}CO_2$ nel polmone



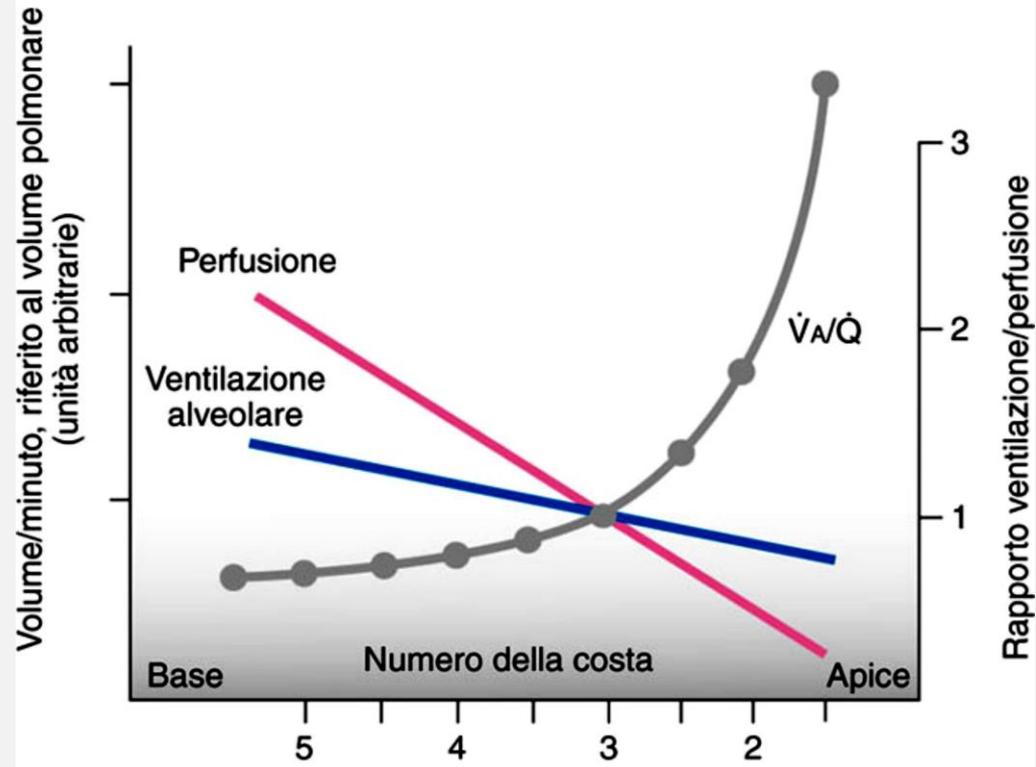
# Curva di distribuzione localizzazione nel polmone



# Variazioni di $V'_A/Q'$ lungo il polmone

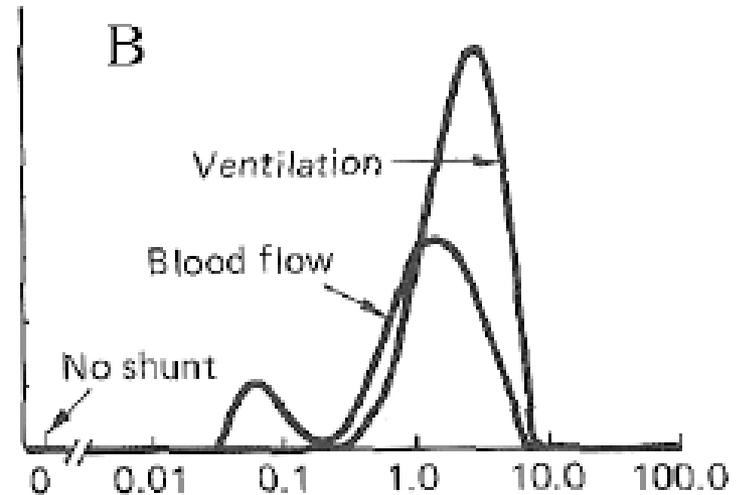
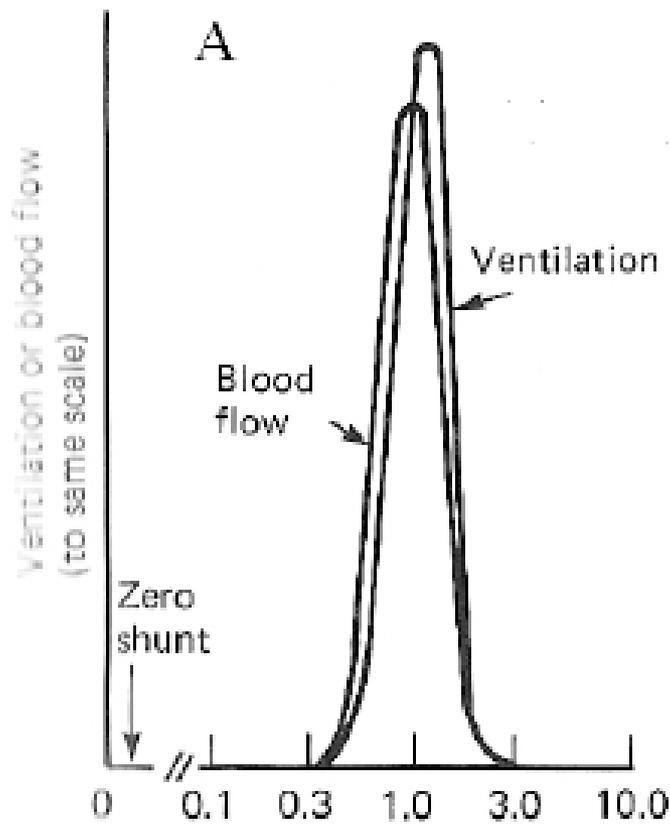


$V'_A/Q'$  è maggiore all'apice che alla base del polmone (in ortostatismo)



$V'_A/Q'$  aumenta andando verso l'apice del polmone sempre (in ortostatismo)

# Distribuzione $V'A/Q'$ nel sano e nel patologico



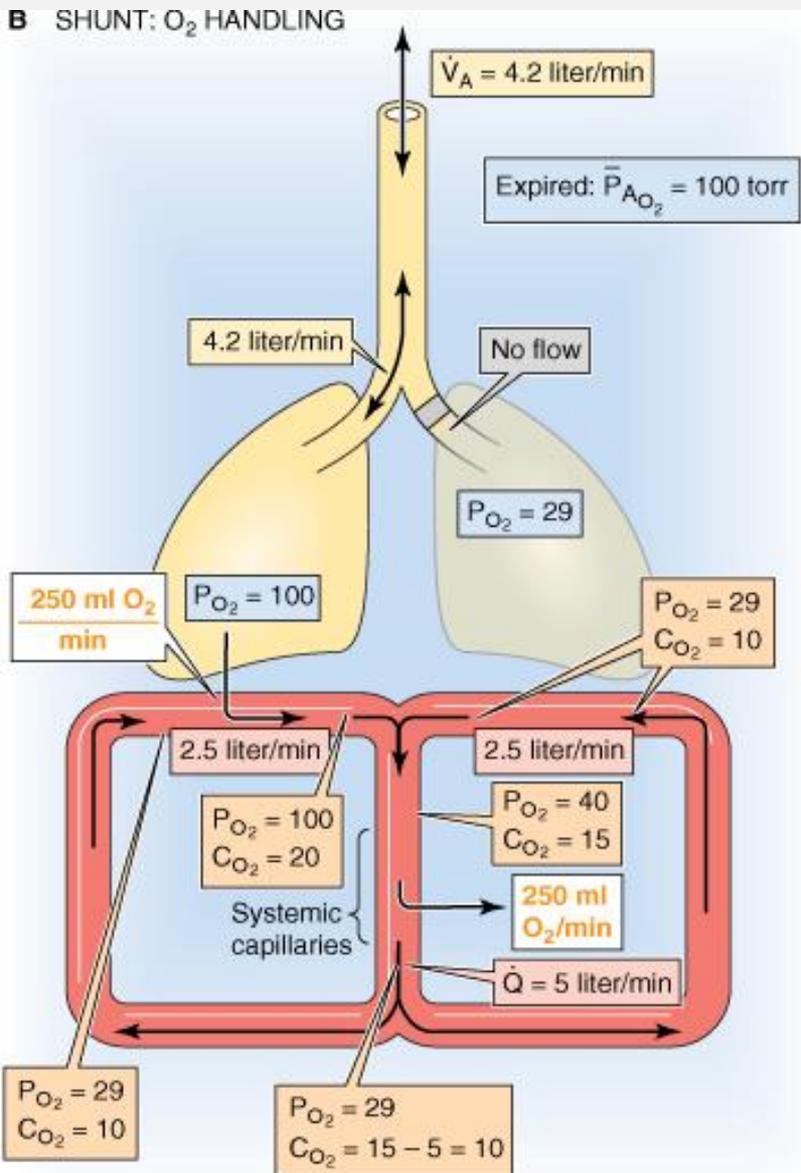
# Riassumendo

- La conclusione che si deve ricordare è la seguente: sebbene esista un **perfetto equilibrio** sia per  $O_2$  che per  $CO_2$  in ciascuna zona tra **aria alveolare e sangue all'uscita dei capillari**, l'aria mista alveolare espirata ha una  $PO_2$  ( $P_AO_2$ ) più alta (e una  $PCO_2$  più bassa,  $P_{AC}O_2$ ) del **sangue arterioso** a valle del polmone ( $P_aO_2, P_aCO_2$ )
- In questo modo si instaura il cosiddetto **gradiente alveolo-capillare di  $PO_2$**
- Normalmente, in presenza di scarsa maldistribuzione del rapporto  $V'_A/Q'$  è molto basso (2 - 3mm Hg)
- In vari tipi di patologie (BPCO), vi può essere una marcata maldistribuzione di  $V'_A/Q'$  ed il gradiente può essere molto ampio; si instaura iposseimia
- La maldistribuzione del rapporto  $V'_A/Q'$  è la causa prevalente (70-80 %) di ipossiemia

# Shunt

- **Shunt:** si riferisce al volume di sangue che entra nel sistema arterioso senza passare attraverso le aeree ventilate del polmone
- Anche nel polmone normale un certo volume di sangue ritorna al sangue arterioso in parte impoverito di  $O_2$  attraverso le vene bronchiali
- Un'aliquota aggiuntiva proviene dal seno coronarico (vene di Tebesio)
- In alcuni pazienti il volume di sangue venoso misto aggiunto non è trascurabile e si assiste ad una notevole caduta di  $P_aO_2$

# Shunt



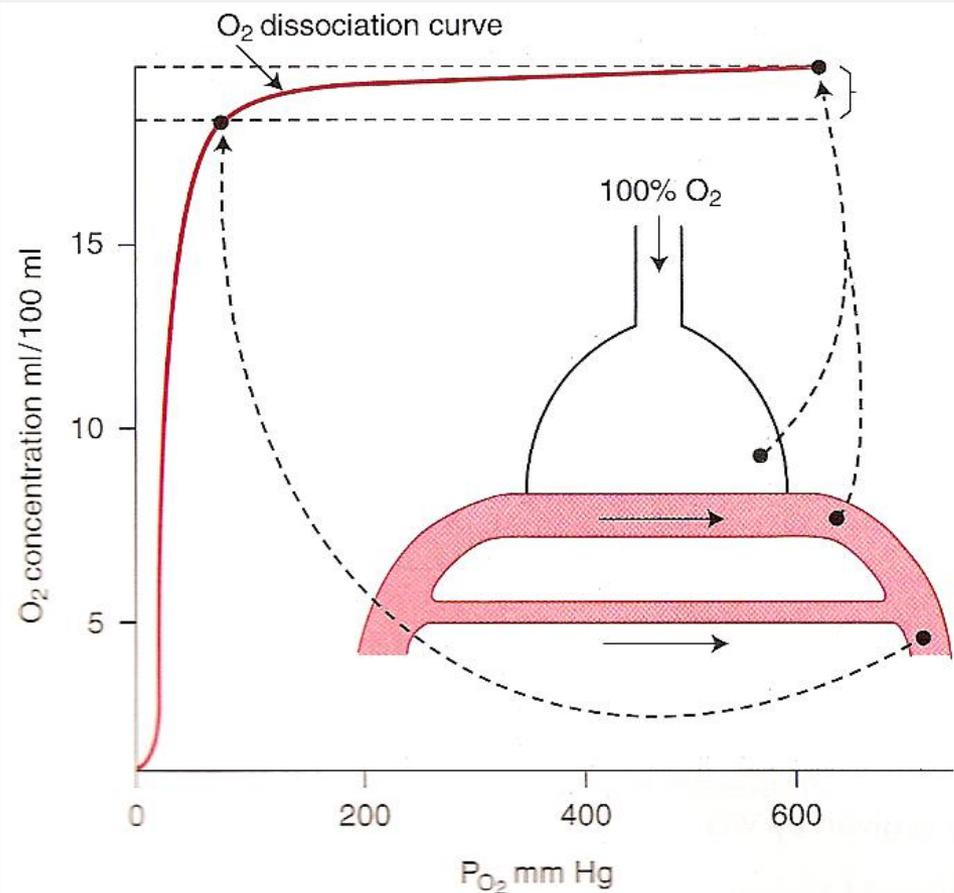
- Quando lo shunt è causato dall'aggiunta di sangue venoso misto è possibile calcolare il flusso di sangue attraverso lo shunt

$$\dot{Q}_T \cdot C_a O_2 = \dot{Q}_S \cdot C_v O_2 + (\dot{Q}_T - \dot{Q}_S) \cdot C_c' O_2$$

$$\frac{\dot{Q}_S}{\dot{Q}_T} = \frac{C_c' O_2 - C_a O_2}{C_c' O_2 - C_v O_2}$$

- Quando lo shunt è causato dall'aggiunta di sangue che non ha la stessa concentrazione di O<sub>2</sub> del sangue venoso misto, è possibile calcolare lo shunt come se fosse dovuto dall'aggiunta di un volume di sangue venoso misto capace di causare lo shunt osservato

# Shunt



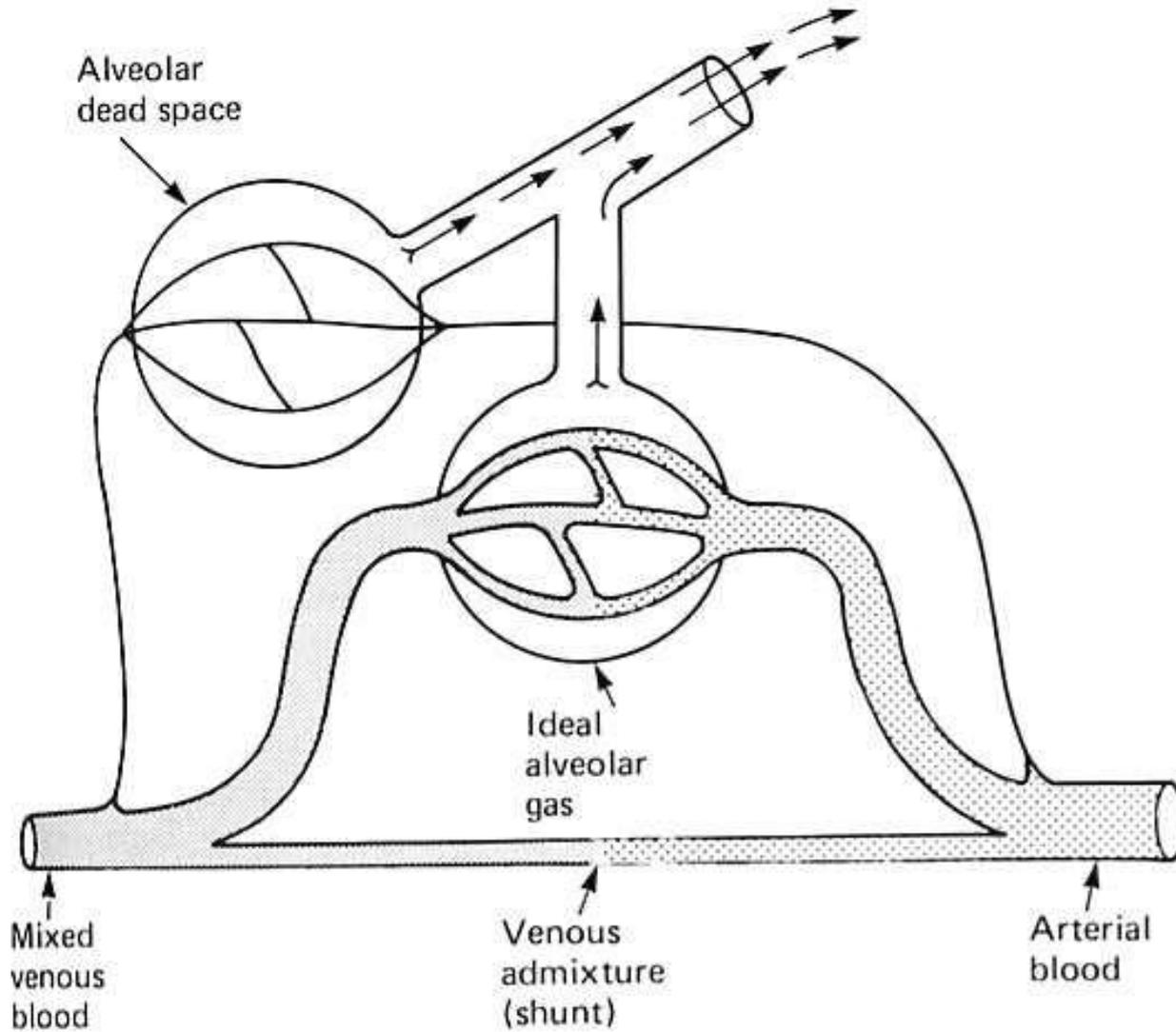
- Nello shunt, l' ipossiemia non può essere abolita nemmeno inspirando  $O_2$  puro
- Una piccola diminuzione di  $C_aO_2$  procura una notevole caduta di  $P_aO_2$  a causa della non-linearità della curva di dissociazione della Hb

# Quantificazione ("semplice") della disomogeneità di $V'_A/Q'$

## Modello tri-compartimentale di Riley:

1. Alveoli ventilati, ma non perfusi
2. Alveoli perfusi, ma non ventilati
3. Alveoli idealmente perfusi e ventilati

# Modello di Riley



# Modello di Riley (cont.)

1. Ventilati non perfusi  
Comprendono lo spazio morto alveolare
2. Perfusi non ventilati  
Rappresentano uno shunt
3. Gli scambi gassosi possono avvenire solo nel compartimento "ideale" (R uguale a QR medio dell'organismo =  $V'CO_2/V'O_2$ )

# Bibliografia

- **Fisiologia dell'Uomo, autori vari, Edi.Ermes, Milano**
- **Capitolo 12: Il polmone (Capitolo 12.7)**
- **Fisiologia Medica, a cura di Conti F, seconda edizione, Edi.Ermes, Milano**
  - **Capitolo 51: Scambi gassosi**
  - **Capitolo 52: Rapporto ventilazione-perfusione**
- **West JB, Fisiologia della Respirazione, IV edizione italiana, PICCIN, Padova**