

Costo energetico e prestazione sportiva

Fisiologia della prestazione sportiva

Università degli Studi di Verona
Scienze Motorie
aa 2012-1013

Il Costo Energetico della Locomozione Umana

**Quantità di Energia Metabolica spesa per
Unità di distanza per avanzare ad una
determinata velocità**

**(kJ km⁻¹; J m⁻¹ kg⁻¹; ml O₂ m⁻¹ kg⁻¹)
(20.9 J = 1 mlO₂ se RQ = 0.96)**

Componenti di C

- **Locomozione umana su terreno in piano**
- $C = C_{NA} + C_{AE}$
- $C = C_{NA} + k' v^2$
- $k' = A C_x (0.5 \rho) \eta^{-1}$
- $C = C_{NA} + A C_x (0.5 \rho v^2) \eta^{-1}$

Componenti di C

- **Locomozione umana su terreno in piano**
 - C_{NA}
 - **Lavoro interno**
 - **Attriti**
 - **Lavoro meccanico cardiaco e dei muscoli respiratori**
 - **Contrazioni per mantenere la postura**

Determinazione di C

Condizioni aerobiche - $E' < V'O_{2\max}$

$$E' \propto ATP' = cV'O_{2ss}$$

$$C_s = V'O_{2ss} v^{-1}$$

Componenti di C

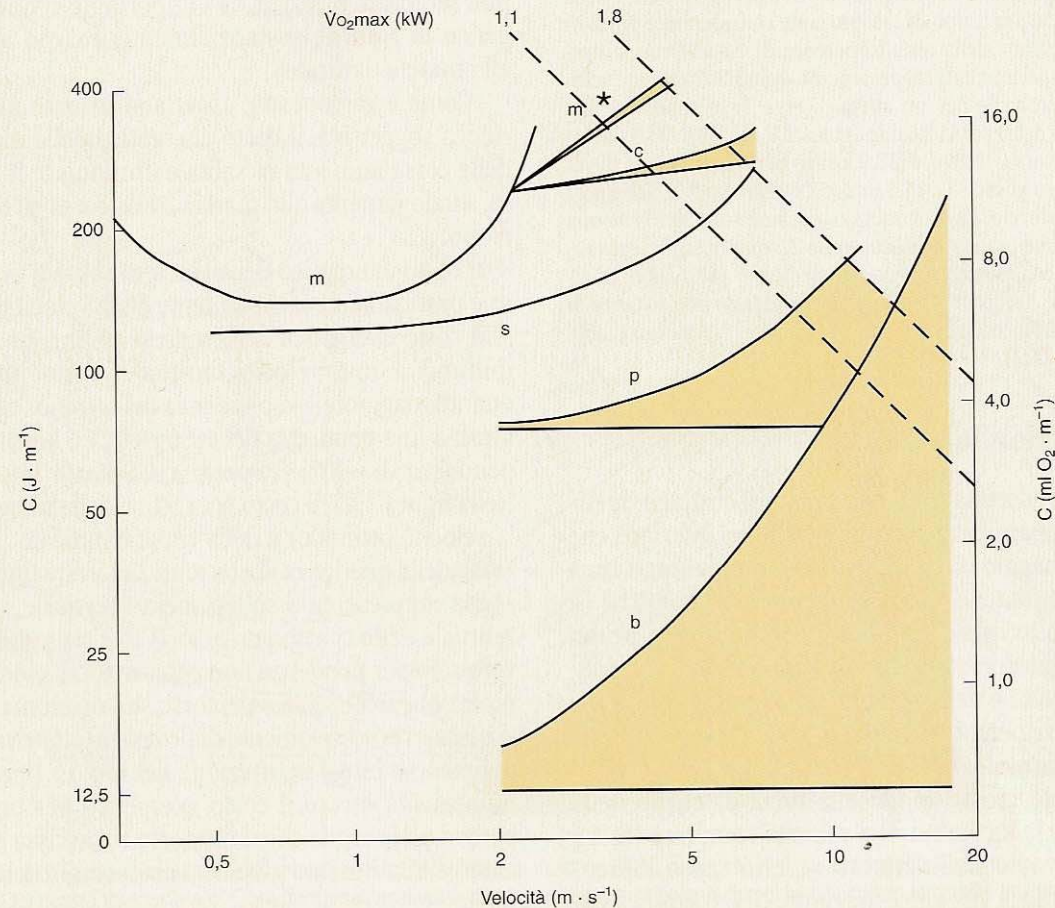


Figura 23.1 - Energia spesa per unità di percorso, C ($\text{J} \cdot \text{m}^{-1}$ o $\text{ml O}_2 \cdot \text{m}^{-1}$) in funzione della velocità (m/s) per un soggetto di 70 kg e 175 cm, a livello del mare ($\text{PB} = 760 \text{ mmHg}$) a 20°C , su terreno pianeggiante, in assenza di vento, durante marcia (m), marcia agonistica (m^*), corsa (c), sci di fondo (s, passo spinta, temperatura della neve -3°C), pattinaggio di velocità su ghiaccio (p), ciclismo (b, bicicletta da corsa in posizione abbassata sul manubrio). In ciascun tipo di locomozione, la distanza verticale tra le due curve è la spesa contro la resistenza dell'aria. Nella marcia naturale quest'ultima è così esigua che le due curve coincidono, mentre nello sci di fondo essa non è nota con precisione. Per ulteriori dettagli si rimanda al testo.

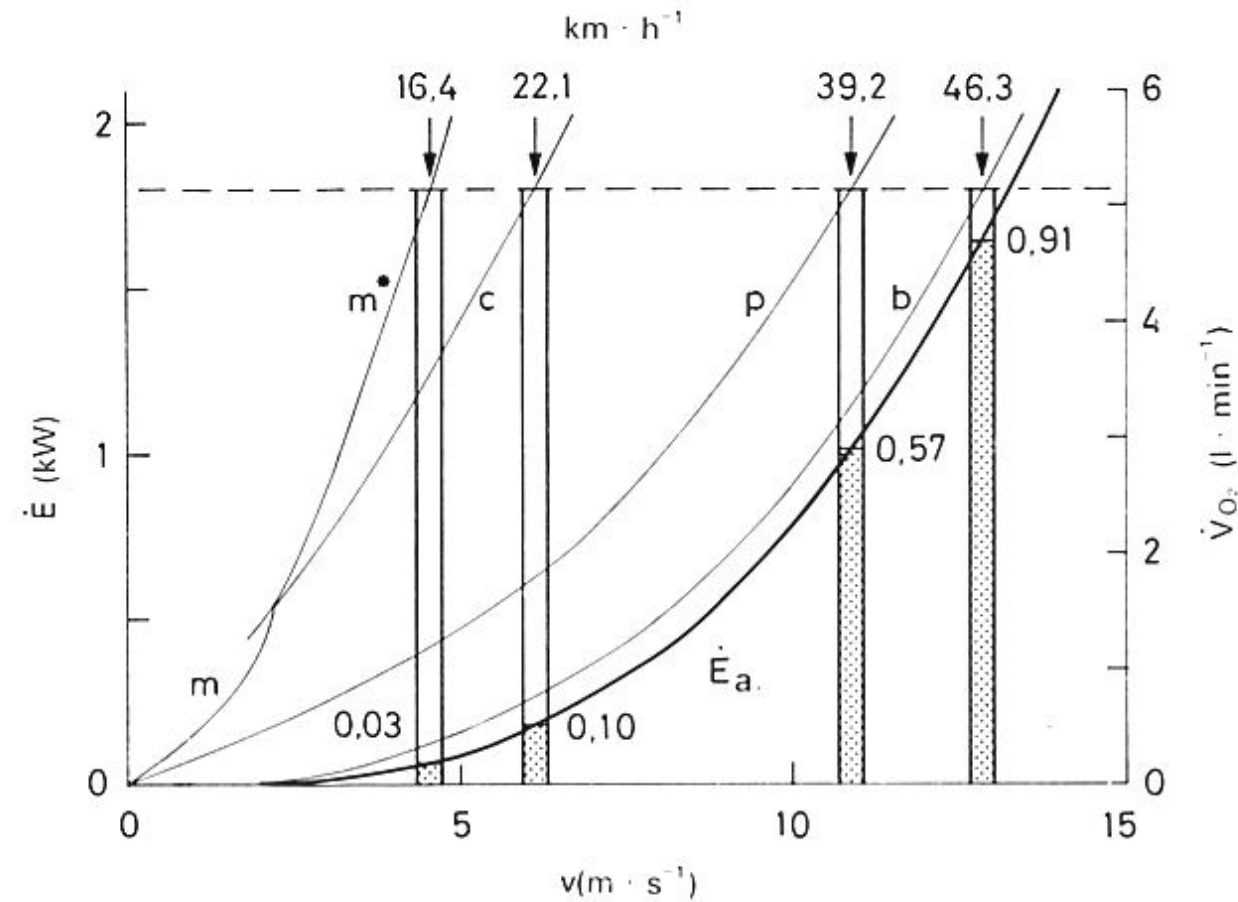
Componenti di C - nella realtà

	Corsa	Ciclismo
$k' \text{ (J s}^2 \text{ m}^{-3}/\text{m}^2\text{)}$	0.40	0.48
$C_a \text{ (J m}^{-1}\text{)}$	$0.74 v^2$	$0.89 v^2$
C_d	1.10	0.592
$C_{na} \text{ (J m}^{-1} \text{ kg}^{-1}\text{)}$	3.86	0.31
$C \text{ (J m}^{-1}\text{)}$	$289 + 0.74 v^2$	$26 + 0.89 v^2$

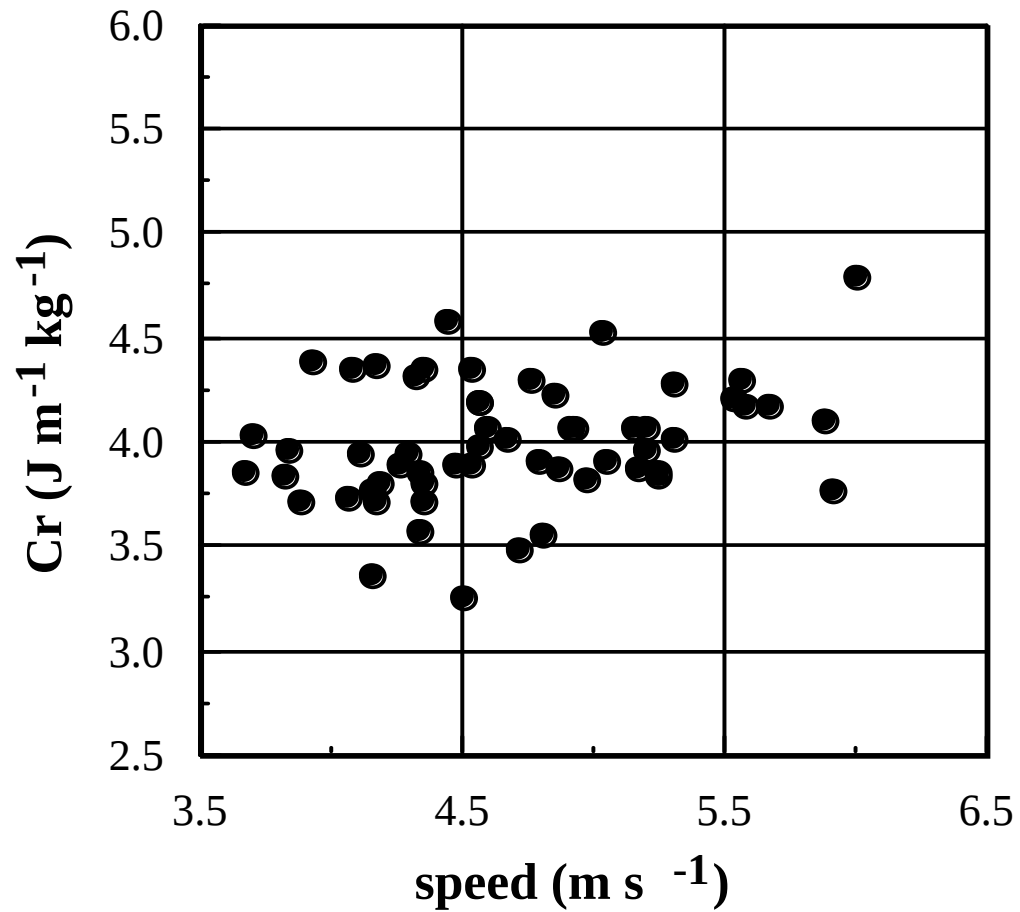
PB = 760 mm Hg; T = 20 ° C; MC = 75 kg; St: 175 cm; UR = 50%

Potenza metabolica, C e *top performances*

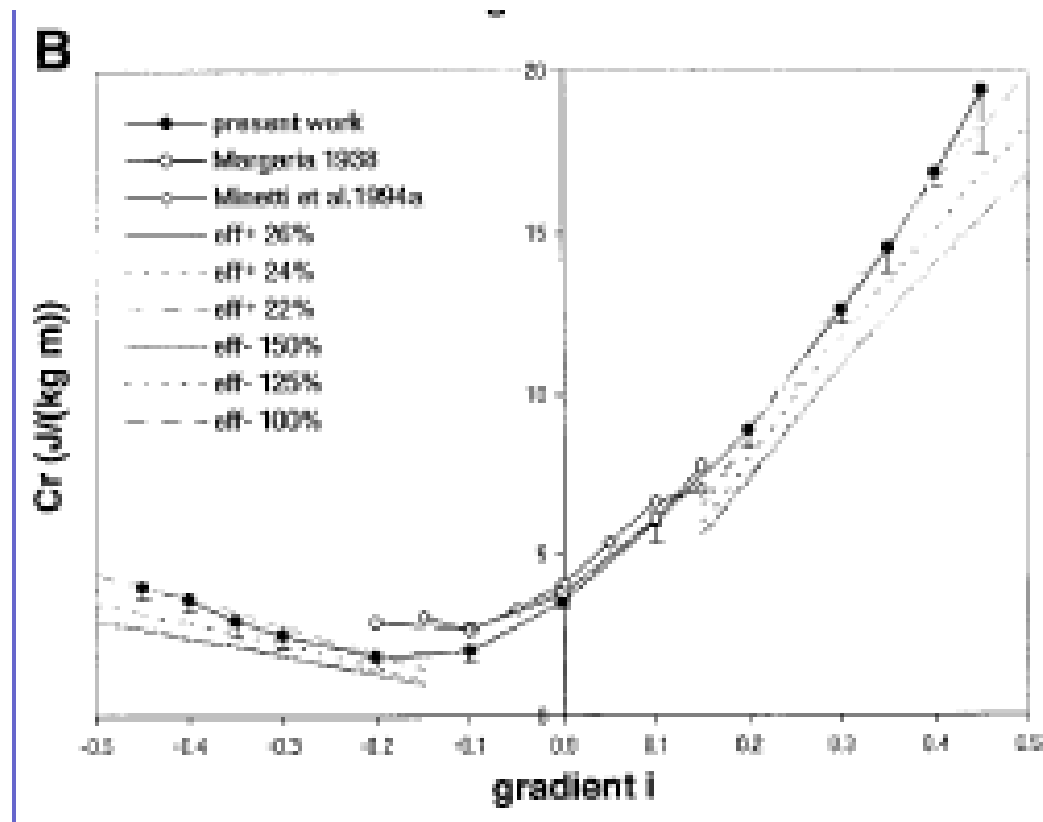
$$E' = C \cdot v$$



Costo energetico della corsa in piano



Costo energetico della corsa su terreno inclinato



Da Minetti et al, 2002

Prestazioni di “Endurance” nella corsa

- **Potenza = Costo energetico • velocità**
- $E' = C_r \cdot v$
- $v_{\max} = E'_{\max} \cdot C_r^{-1}$
- $v_{\text{END}} = F_r \cdot V'O_{2\max} \cdot C_r^{-1}$

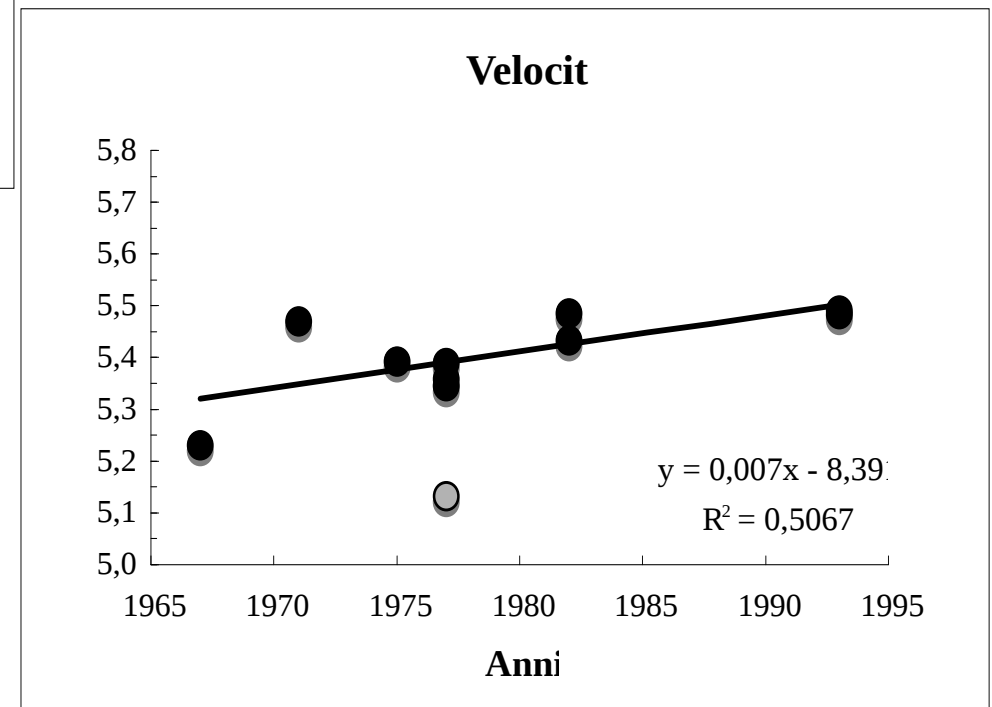
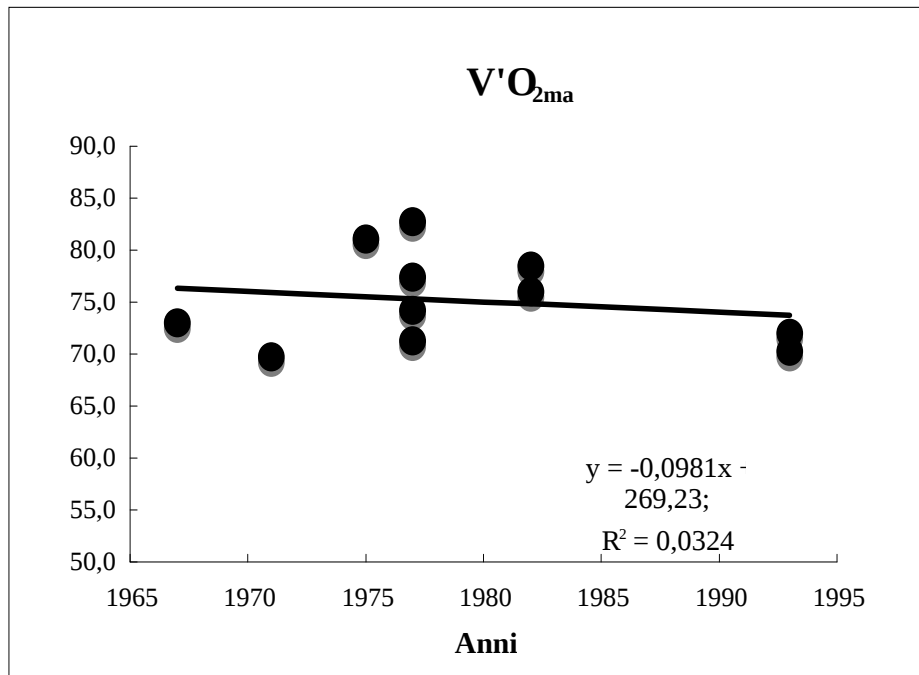
Analisi dei fattori che determinano la prestazione

- La prestazione nella corsa di resistenza dipende, quindi, da:
- $\dot{V}'O_{2\max}$
- F
- C_r

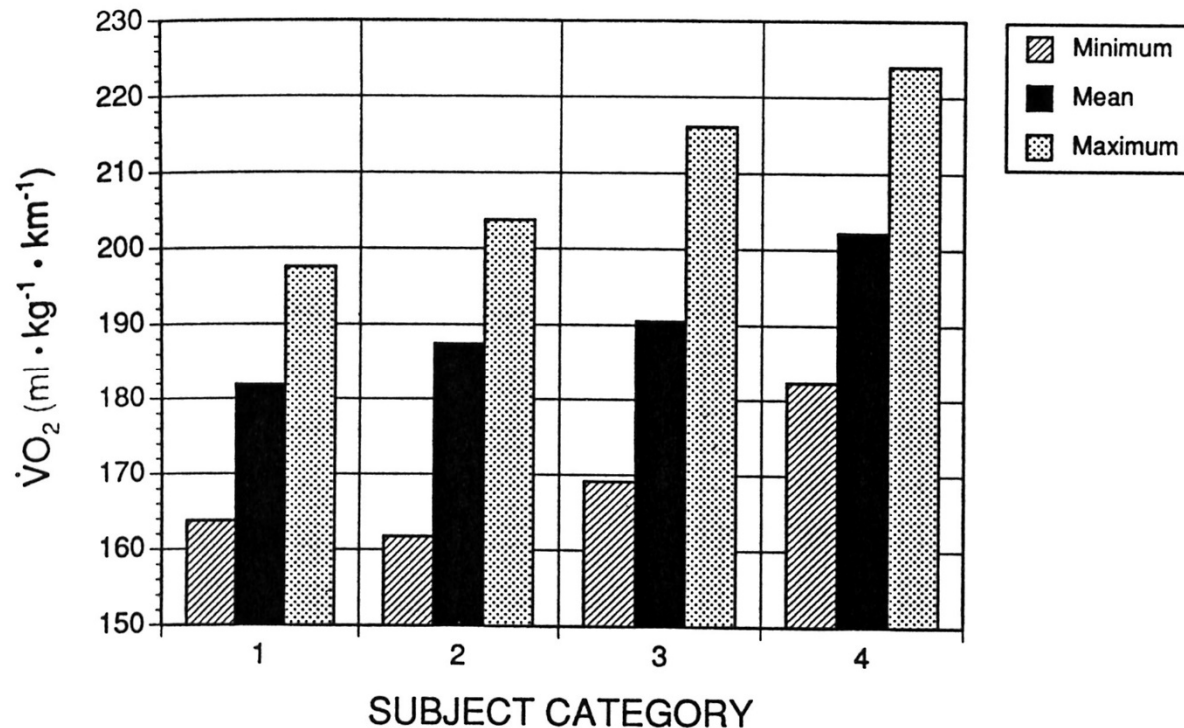
Massimo Consumo di Ossigeno

Atleta	$\dot{V}O_{2\max}$ (ml kg ⁻¹ min ⁻¹)	Prestazione	Referenza
Gary Tuttle	82.7	02:17:00	Pollock (1977)
Craig Virgin	81.1	02:10:26	Cureton et al (1975)
Bill Rodgers	78.5	02:09:27	Rodgers & Concannon (1982)
Don Kardong	77.4	02:11:15	Pollock (1977)
Alberto Salazar	76.0	02:08:13	Costill (1982)
Kenny Moore	74.2	02:11:36	Pollock (1977)
Buddy Edelen	73.0	02:14:28	Dill et al (1967)
Zithulele Sinqe	72.0	02:08:05	Coetzer et al (1993)
Frank Shorter	71.3	02:10:30	Ploock (1977)
Willie Mtolo	70.3	02:08:15	Coetzer et al (1993)
Derek Clayton	69.7	02:08:34	Costill et al (1971)

Evoluzione nel tempo



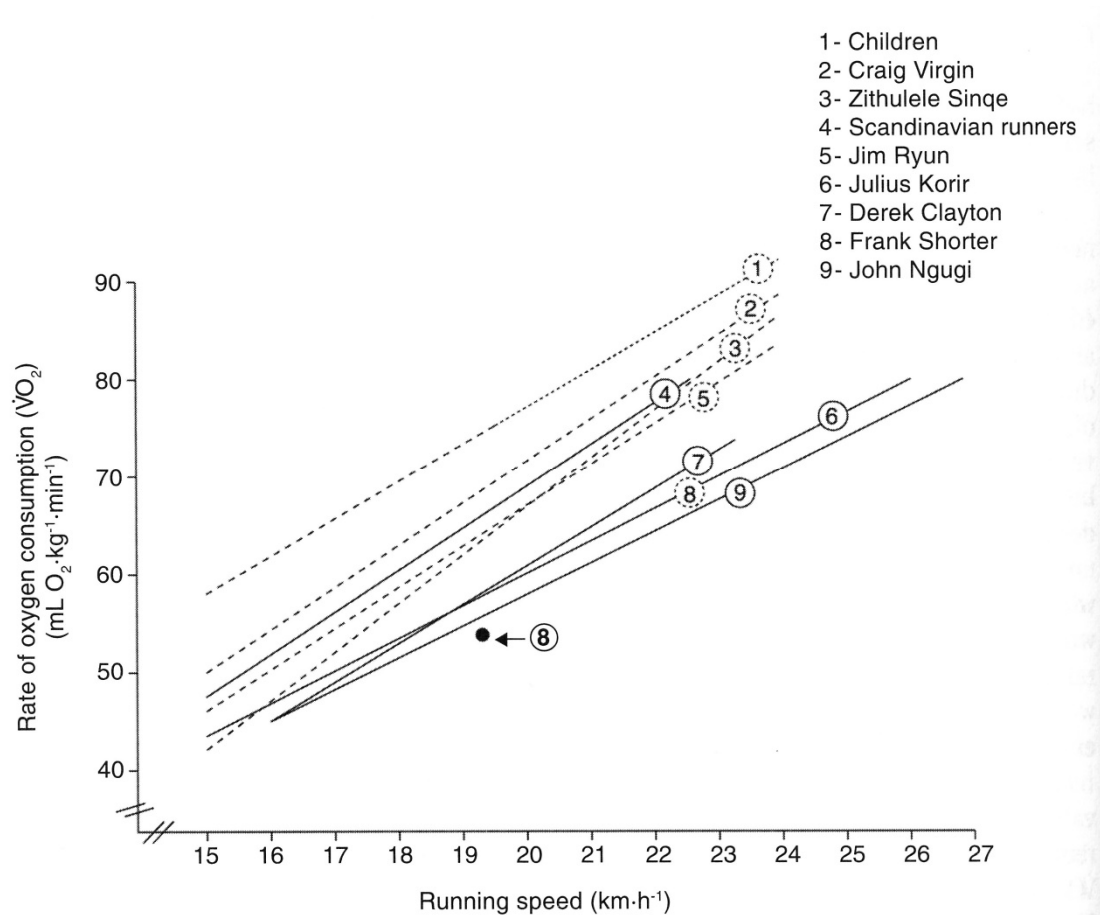
C_r nei corridori



- Sebbene la variabilità sia notevole ed esista una notevole sovrapposizione tra i gruppi, i **corridori di elite** sono significativamente **più economici** degli altri

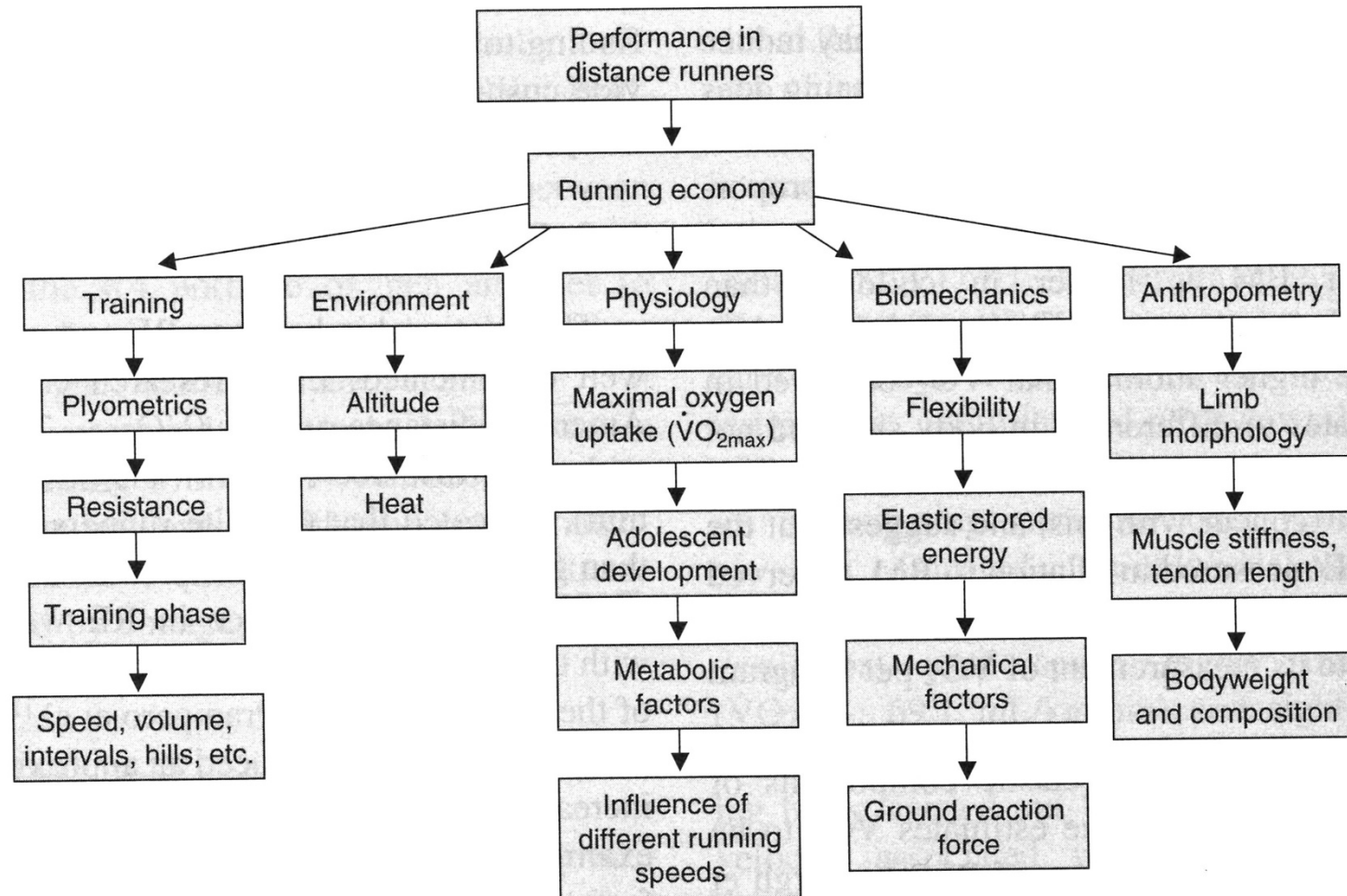
Da Morgan et al, 1995

C_r nei corridori di elite



- C'è una **notevole variabilità** di C_r tra gli atleti di elite
- Non sono ancora chiare le cause di questa variabilità

Fattori che possono influenzare C_r



Fattori Biomeccanici e C_r

Fattori	Modificazioni correlate con una economia di corsa più elevata
Statura	Media o poco inferiore alla media per gli uomini e poco superiore alla media per le donne
Percentuale di grasso corporeo	Bassa percentuale
Morfologia delle gambe	Massa distribuita prevalentemente vicino all'articolazione dell'anca
Pelvi	Stretta
Piedi	Più piccoli della media
Scarpe	Leggere e ben ammortizzate
Lunghezza della falcata	Liberamente scelta; frutto di lungo allenamento
Cinematica	Limitate oscillazioni verticali del centro di massa
	Angoli acuti dell'articolazione del ginocchio durante lo riporto dell'arto
	Angolo di rotazione limitato in flessione plantare - ma maggiore velocità angolare - durante lo stacco del piede
	Movimenti delle braccia non eccessivi
	Rotazione delle spalle più veloce sul piano trasversale
	Escursione angolare delle anche e delle spalle più accentuata sull'asse polare nel piano trasverso
Dinamica	Basse forze di reazione verticali
Energia elastica	Riutilizzo efficace dell'energia elastica immagazzinata negli elementi elastici in serie
Allenamento	Allenamento esplosivo con pliometria
Superficie del terreno	Moderata deformabilità

Biomeccanica e C_r

- Nei corridori **meno** efficienti, le **forze di reazione verticali sono maggiori** (*Heise e Martin, 2001*)
- In particolare, il **40 % della variabilità** di C_r è spiegato dalla **variazione del momento verticale totale**
- Questo riscontro è coerente con quanto ipotizzato da Kram e Taylor: “...il costo per sostenere il peso dell’animale e il tempo necessario per generare la forza necessaria a farlo sono i principali determinanti del costo energetico della corsa...” (*Kram e Taylor, 1990*)

C_r e fatica

- C_r , in termini di $V'O_2$ per km, aumenta in funzione della distanza: 0.123 % al km (*Brueckner et al, 1991*).
- In termini di consumo energetico per km - calcolato da $V'O_2$ e QR - aumenta dello 0.08 % al km.
- Al termine di una maratona, quindi C_r aumenta: i) del 5 % (ml O_2 /km), e del 3 % (kJ / km).
- $V'O_{2max}$: 83 ml/min/kg; F: 0,73; C_r : 187 ml O_2 /km/kg. Un aumento di C_r del 5 % equivale al peggioramento del tempo sulla maratona da 2:08:18 a 2.14:43

C_r e fatica

- Dopo un test su treadmill ad esaurimento (3000 m) l'aumento di C_r è legato alle modificazioni della **variabilità della frequenza dei passi e del lavoro contro gravità eseguito sul centro di massa** (Candau et al, 1998)
- Al termine di una maratona:
 1. la massima forza isometrica degli estensori della gamba è diminuita;
 2. le prestazioni meccaniche durante una serie di cinque balzi risultavano peggiorate e il profilo delle forze verticali alterato
 3. l'attività elettromiografica (iEMG) durante la contrazione isometrica massimale degli estensori della gamba era diminuita
 4. lo stesso livello di forza sotto-massimale era mantenuta al costo di una maggiore attivazione neuromuscolare
- Si suppone, quindi, che ripetuti cicli di lavoro eccentrico - concentrico siano in grado di **diminuire la tolleranza dei muscoli allo stiramento, compromettere la capacità di recupero elastico e deteriorare l'accoppiamento elettro-meccanico muscolare** (Komi et al, 1991)

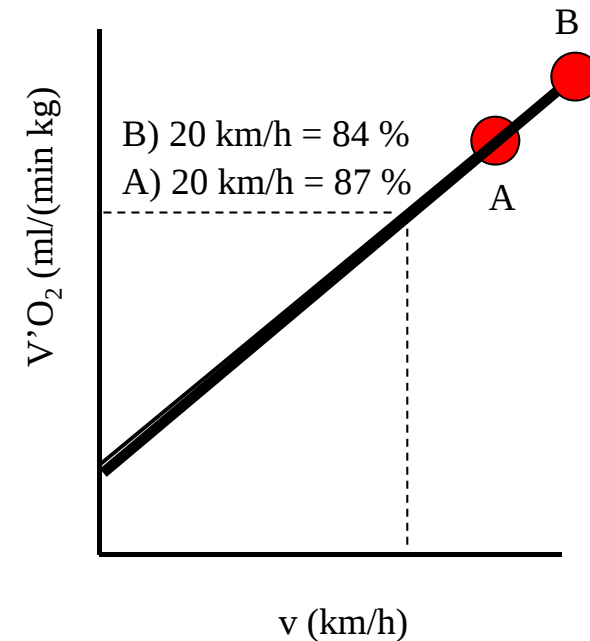
Prestazione e MC

- $\dot{V}'O_{2\max}$: 4.5 (L min⁻¹)
- C_r : 187 mlO₂ km⁻¹ kg⁻¹

MC (kg)	$\dot{V}'O_{2\max}$ (ml min ⁻¹ kg ⁻¹)	$\dot{V}'O_2$, 20 km hr ⁻¹ (ml min ⁻¹ kg ⁻¹)	% $\dot{V}'O_{2\max}$ (%)
65	74	65.5	87

- MC - 5 %

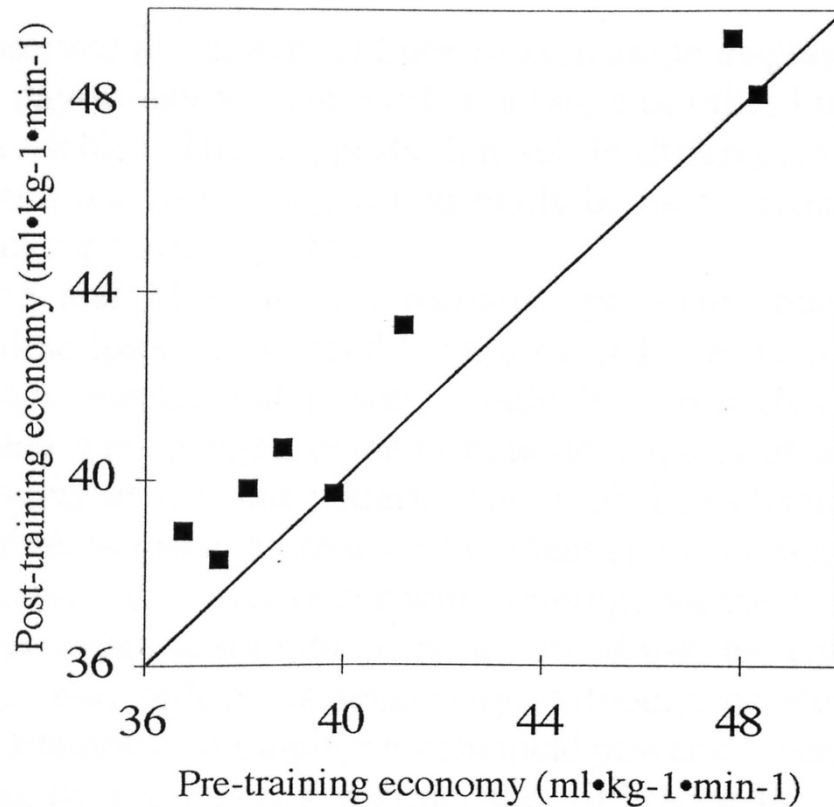
MC (kg)	$\dot{V}'O_{2\max}$ (ml min ⁻¹ kg ⁻¹)	$\dot{V}'O_2$, 20 km hr ⁻¹ (ml min ⁻¹ kg ⁻¹)	% $\dot{V}'O_{2\max}$ (%)
62	78	65.5	84



C_r e antropometria

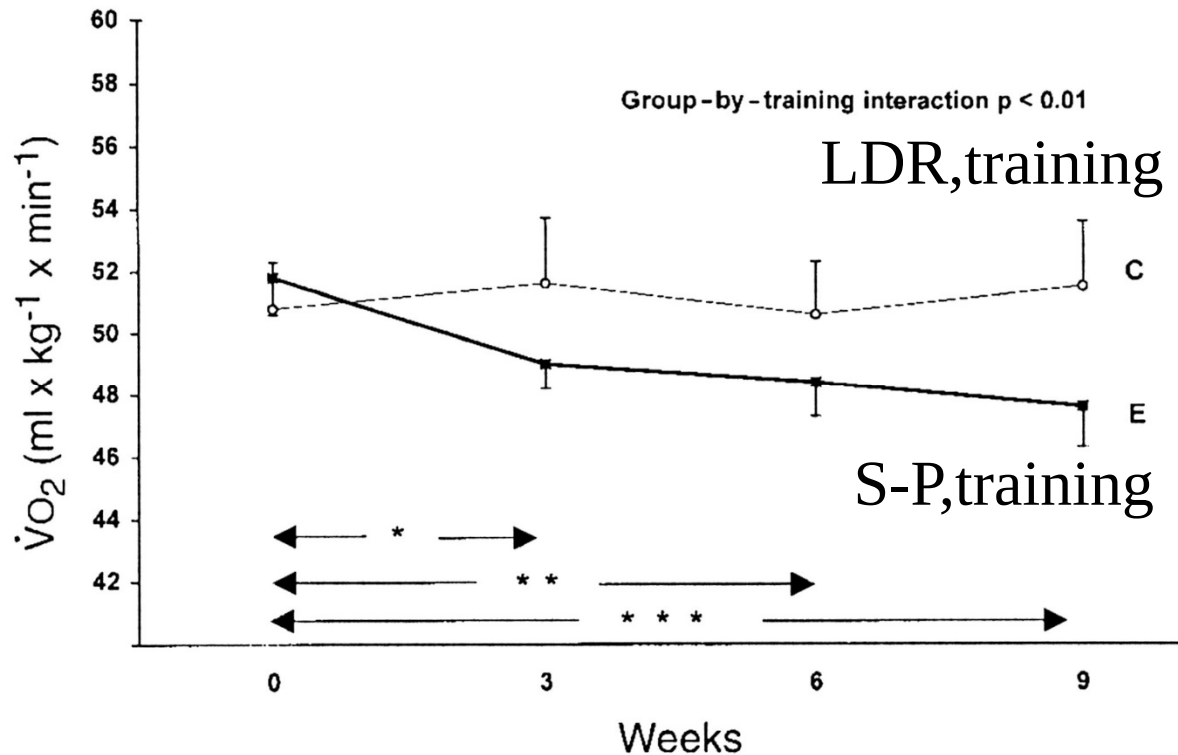
- In realtà la **massima velocità aerobica o di endurance** è **praticamente indipendente dalla massa corporea**
- $V'O_{2\max} (W) = 100 \cdot MC^{0.67}$
- $V'O_{2\max}/MC^{0,67} = 100$
- $C_r (J/m) = 12,5 \cdot MC^{0.70}$
- $C_r / MC^{0,70} = 12,5$
- $V_{\max} = V'O_{2\max}/C_r = 8 \cdot MC^{-0.03}$

C_r e allenamento



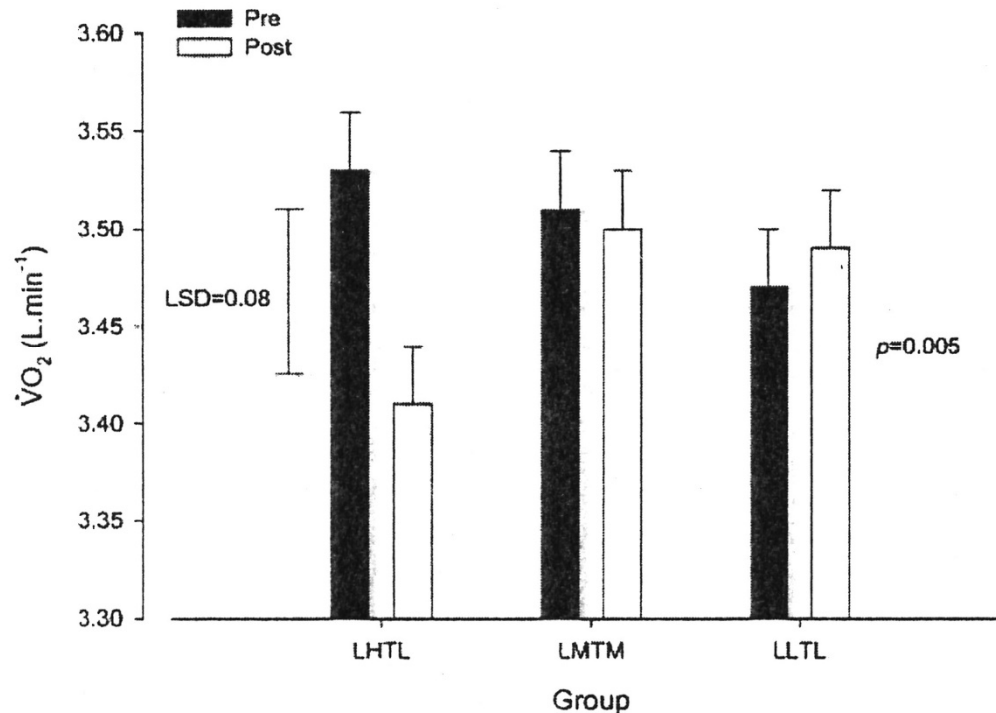
- Sei settimane di **allenamento con corsa** (24-32 Km/settimana) **non diminuiscono** il costo energetico in un gruppo di giovani studenti moderatamente attivi (*Lake e Cavanagh, 1996*)

C_r e allenamento



- Nove settimane di **allenamento esplosivo** alla forza (sprint, pliometria) **migliora l'economia di corsa** ($\dot{V}O_{2ss}$ a 4,17 m/s) in corridori di elite
- L'effetto dell'allenamento è riconducibile al **miglioramento della funzionalità neuromuscolare** con più efficace recupero dell'energia elastica durante la corsa.

C_r e altitudine



(Saunders et al, 2004)

- Corridori di endurance di alto livello
- **V'O_{2ss} a 14, 16 e 18 km/hr diminuisce** significativamente dopo 4 settimane di **esposizione intermittente** (5 notti/settimana) **ad ipossia normobarica** corrispondente all'altitudine di 2000-2500 m slm
- Allenamento a 600 m slm
- Maggiore utilizzazione di carboidrati, maggiore produzione di ATP per mole di O₂ utilizzata, diminuito costo della ventilazione, aumentata efficienza neuromuscolare

- **V'O_{2ss} diminuisce** dopo 14 gg di **esposizione intermittente a ipossia normobarica** (12.3 % O₂, 3 ore/die) in un gruppo di 15 corridori a piedi sulle lunghe distanze (Katayama et al, 2004)

Massima frazione di $\dot{V}O_{2\max}$ (F)

L'indice di Endurance di Péronnet e Thibault

$$IE = \frac{(100 - \% \dot{V}O_{2\max})}{\ln 7 - \ln t}$$

$$IE = \frac{(\Delta \% \dot{V}O_{2\max})}{\Delta \ln t}$$

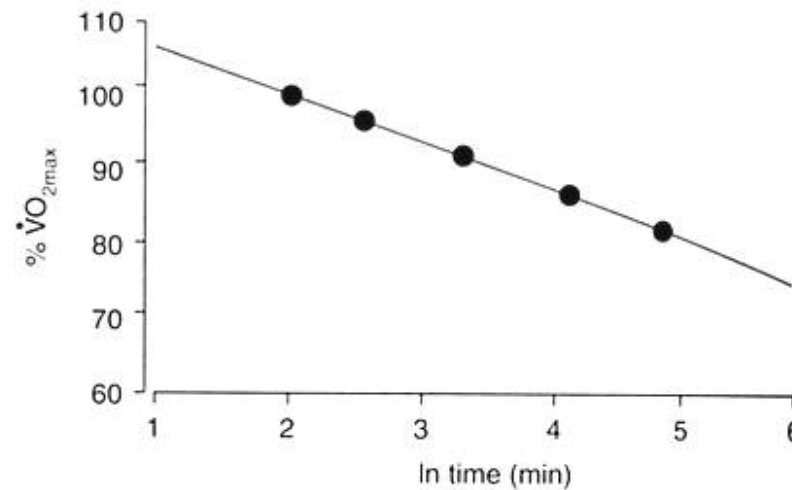
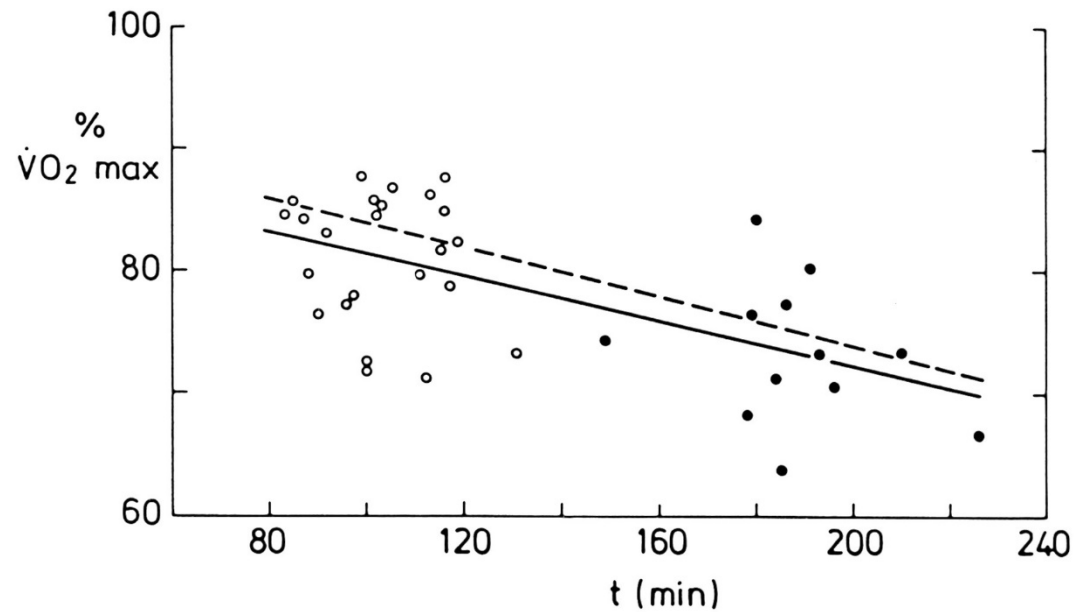


Fig. 3. Fractional utilisation of maximal oxygen uptake ($\dot{V}O_{2\max}$) as a function of the natural logarithm (ln) of performance time.^[12]

- $\dot{V}O_{2\max}$ può essere sostenuto per 7 minuti
- Utile per confrontare individui con differenti $\dot{V}O_{2\max}$ e differenti performances

Massima frazione di $\dot{V}'O_{2\max}$ (F)



- Linea continua sperimentale:
 $y = 90.5 - 0.091 t$
- Linea tratteggiata, Saltin:
 $y = 94 - 0.1 t$

(di Prampero et al, 1986)

Allenamento per *Long Distance* *Running Performance*

- **I determinanti della prestazione sono:**
 - $V'O_{2\max}$
 - C_r
 - $F V'O_{2\max}$, correlata con LT

Allenamento e Adattamento

- Soglia minima di intensità
- Soglia minima della durata
- Combinate, determinano la soglia minima di adattamento
- Struttura tipica di allenamento: 10-14 sessioni la settimana
- Quantificazione:
 - 1) volume: chilometri/la settimana
 - 2) intensità: $\%V'O_{2\max}$, $\%f_{H\max}$, $\%v_{\text{gara}}$

Allenamento e aumento di $\dot{V}O_{2\max}$

Adattamenti indotti dall'allenamento associati con l'incremento di $\dot{V}O_{2\max}$

Adattamento indotto dall'allenamento	Significato fisiologico
Aumento del volume ventricolare, ipertrofia ventricolare concentrica	Aumento del volume di eiezione e della massima gettata cardiaca
Aumento della massa eritrocitaria	Aumento del volume ematico, del volume di eiezione, della capacità di trasporto arteriosa per l' O_2
Aumento della massa plasmatica	Aumento del volume ematico, del volume di eiezione
Aumento dei capillari muscolari	Incremento della diffusione e del consumo di O_2 nei muscoli a parità di P_aO_2 e flusso periferico
Aumento della densità mitocondriale nei muscoli ed aumento dell'attività degli enzimi ossidativi	Aumento del $\dot{V}O_2$ e aumento della differenza aretro-venosa di O_2
Aumento della concentrazione di mioglobina	Diffusione di O_2 facilitata dal sarcolemma ai mitocondri, aumento di $\dot{V}O_2$ a parità di P_aO_2 , aumento della differenza artero-venosa a di O_2

Allenamento e aumento di $\dot{V}O_{2\max}$

In conclusione:

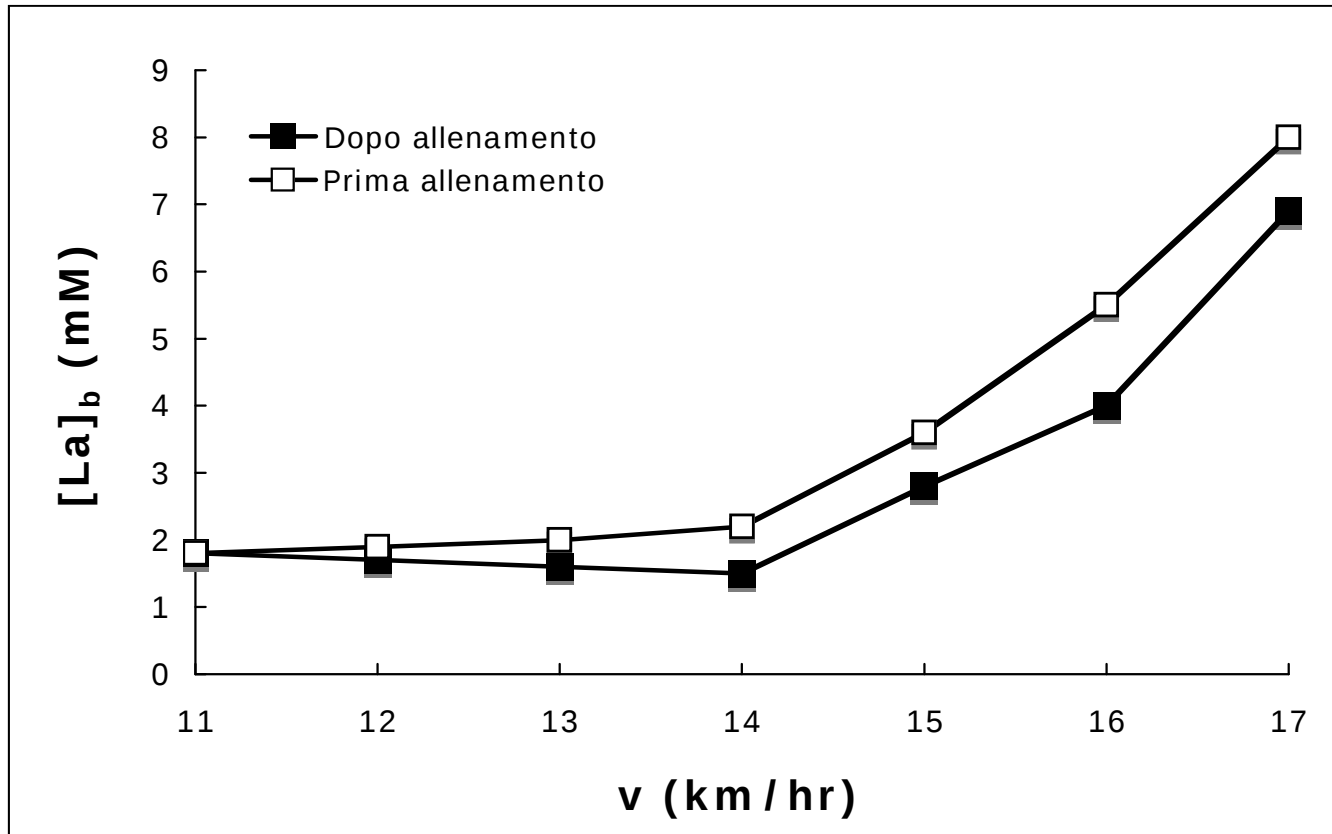
- Alcuni autori hanno suggerito che l'allenamento effettuato a $\dot{V}O_{2\max}$ o vicino a $\dot{V}O_{2\max}$ sia la procedura ottimale per aumentare la massima potenza aerobica.
- Comunque, anche allenamenti sottomassimali e sovramassimali sono stati associati ad incrementi di $\dot{V}O_{2\max}$

Allenamento e aumento di LT

Adattamenti indotti dall'allenamento associati con l'incremento di LT

Adattamento indotto dall'allenamento	Significato fisiologico
Diminuzione della concentrazione di PFK-1 e del rapporto PFK-1/CS (citrato sintasi)	Diminuzione della produzione di lattato
Aumento della densità mitocondriale nei muscoli ed aumento dell'attività degli enzimi ossidativi	Aumento della percentuale di piruvato che entra nel ciclo di Krebs invece di servire come substrato della LDH
Aumento degli enzimi della β -ossidazione	Aumento dell'ossidazione dei lipidi, diminuzione della produzione di energia per ossidazione dei carboidrati e diminuzione della produzione di lattato
Modificazione della espressione della LDH	Diminuzione della velocità di conversione da piruvato a lattato
Aumento dell'espressione di MCT	Aumento della rimozione del lattato
Aumento della forza muscolare	Riduzione del reclutamento di fibre muscolari di tipo II e ridotta occlusione al flusso periferico

LT e training



La relazione LT vs. v può cambiare se C_r , a sua volta, si modifica

Allenamento e aumento di LT

• Conclusioni

- Solo uno studio ha indagato gli effetti dell'aumento di volume (km) dell'allenamento eseguito a velocità subLT o LT
 - *6dd/w, 90-98% volume di allenamento a 50-70 % velocità di gara, il resto interval training ad alta intensità*
 - *no aumento LT, aumento volume di allenamento*
- Altri studi *suggeriscono* che l'inserimento di sedute effettuate a velocità sopraLT inducano significativi aumenti di LT, ma i dati non sono coerenti né univoci.

Allenamento e aumento dell'economia di corsa (C_r più basso)

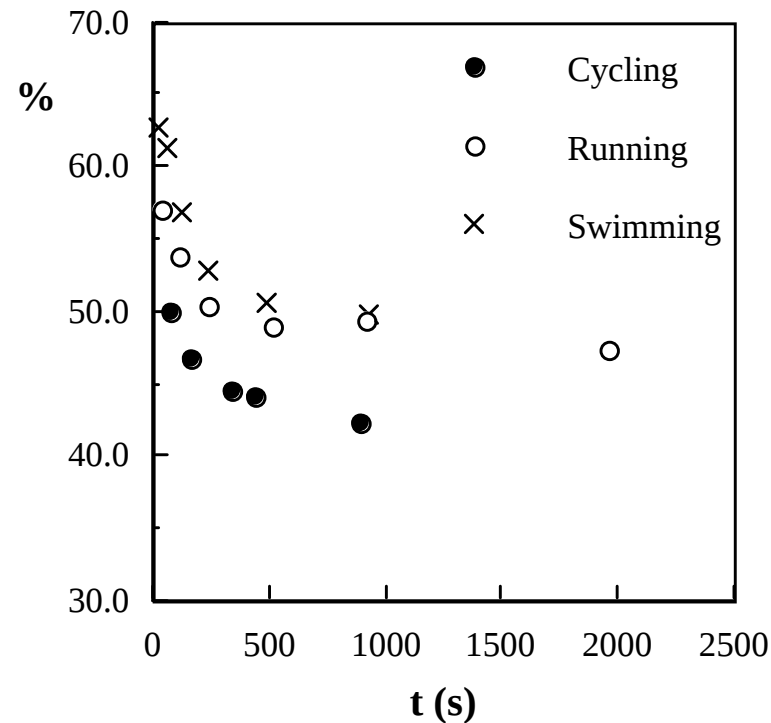
Adattamenti indotti dall'allenamento associati con il decremento di C_r

Adattamento indotto dall'allenamento	Significato fisiologico
Modificazione dell'espressione delle fibre muscolari dal veloci (II) a più lente (I)	Riduzione del dispendio energetico per sviluppare forza, aumento del rendimento muscolare
Diminuzione della ventilazione polmonare totale durante esercizio sotto massimale	Riduzione del consumo di ossigeno dei muscoli respiratori
Aumento del rendimento meccanico della corsa	Riduzione ovvia e diretta di C_r
Aumento della stiffness muscolo tendinea	Aumento della quantità di energia elastica immagazzinata e restituita durante il passo, aumento del rendimento della corsa

Peculiarità del peso di C

- Il peso di **C** nel determinare le prestazioni record (tempi o velocità) è pressochè **indipendente** dalla **potenza metabolica**

Prevalenza del peso di C



- **A prescindere dalla velocità**, le modificazione di BPT (best performance time) causate **esclusivamente dalle variazioni di C** spiegano da sole il 50 % delle variazioni di BPT quando **tutte le altre variabili (MPA, AnAlC, AnLC)** vengono **modificate contemporaneamente** della stessa percentuale

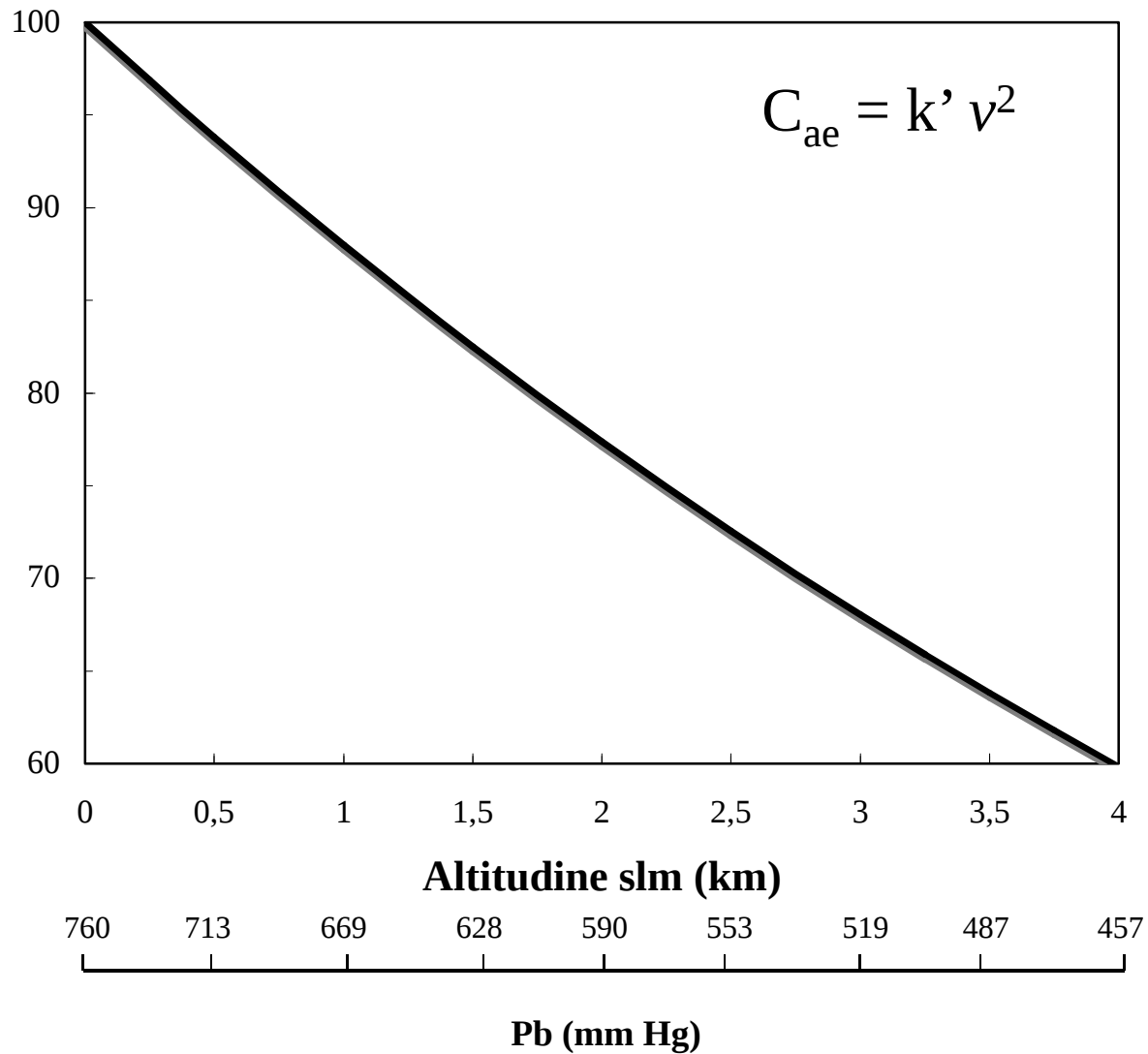
Fattori Ambientali e Prestazioni

1. La densità dell'aria dipende dalla pressione barometrica

$$\rho = \rho_0 \cdot \left(\frac{PB}{760} \right) \cdot \left(\frac{273}{T} \right)$$

- Quindi, l'energia spesa per unità di distanza contro la resistenza dell'aria diminuisce in funzione dell'altitudine

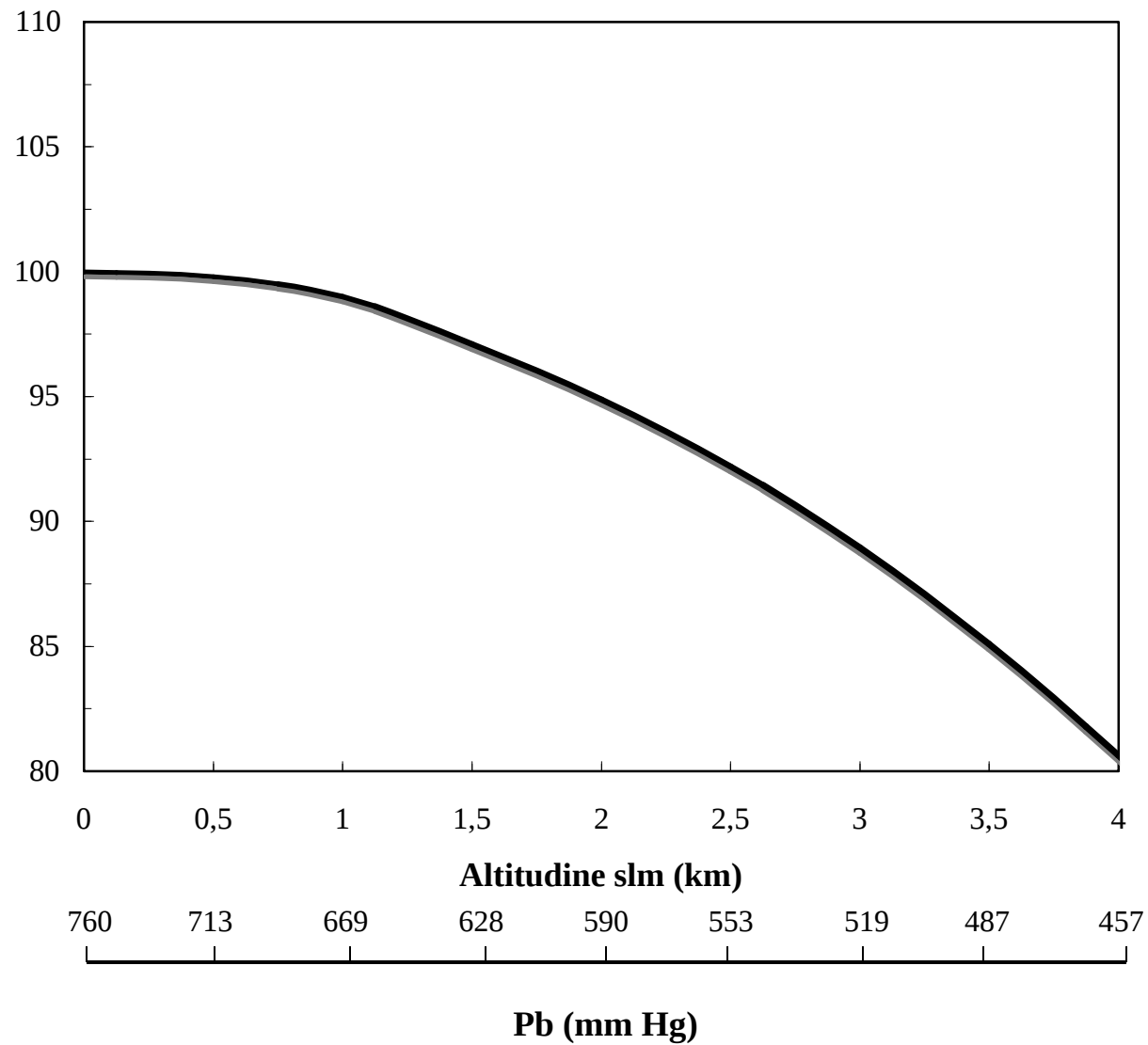
Resistenza aerodinamica ed altitudine



Massima potenza metabolica ed altitudine

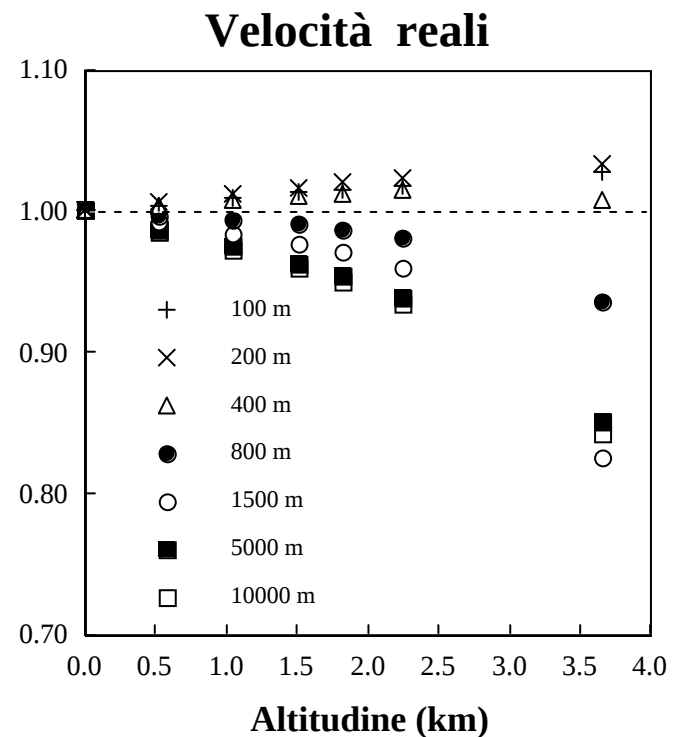
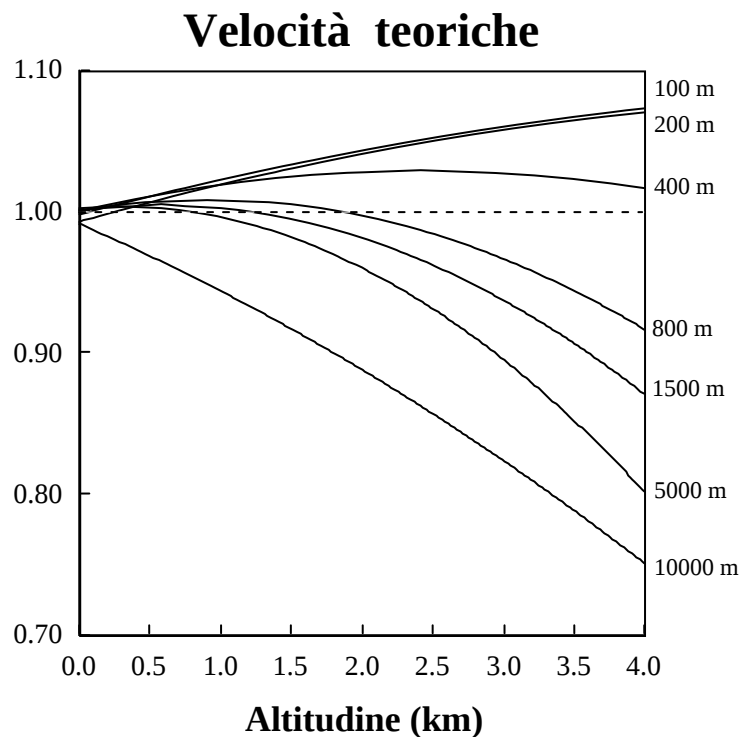
1. La massima potenza anaerobica è *praticamente* indipendente dall'altitudine
2. La pressione parziale di O_2 nell'aria inspirata ($P_I O_2$) diminuisce consensualmente con l'altitudine: $P_I O_2 = F_I O_2 \cdot P_B$
3. Ciò porta con sé la diminuzione del $V'O_{2max}$ e, quindi, di MPA
4. Il nostro organismo, però, mette in atto dei meccanismi di acclimatazione all'ipossia da altitudine che tentano di compensare la diminuzione di $V'O_{2max}$

Massima potenza aerobica ed altitudine



Conseguenze sulle Prestazioni in Altitudine

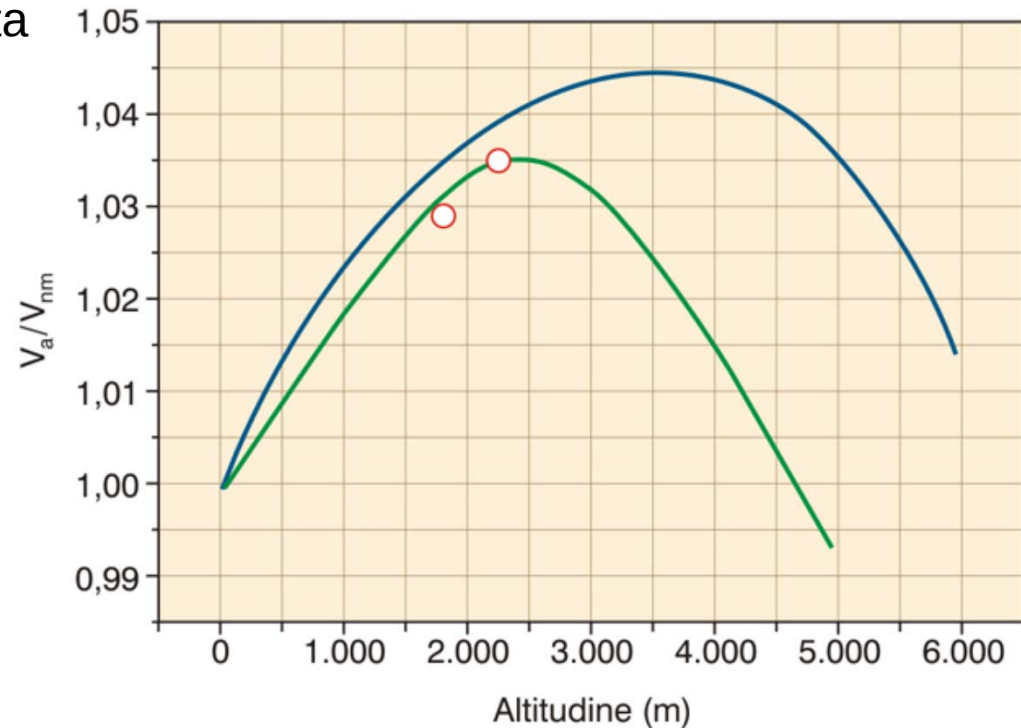
2. Nel caso in cui la spesa energetica per unità di distanza contro le forze aerodinamiche sia significativa (corsa a piedi sulle brevi distanze, ciclismo), in altitudine si raggiungerà una velocità più alta rispetto al livello del mare.
3. La quota ideale sarà tanto più alta quanto maggiore è la velocità (componente aerodinamica)



Record dell'ora in bicicletta in altitudine

4. Anche in questo caso si avrà un'altitudine ottimale a cui l'equilibrio tra diminuzione di ρ e diminuzione di MPA è il più favorevole

- **Curva blu:** previsione eseguita sulla base della diminuzione del $\dot{V}O_{2\max}$ in funzione dell'altitudine descritta da Cerretelli
- **Curva verde:** predizione effettuata tenendo conto del fatto che atleti con il massimo consumo di ossigeno elevato subiscono una maggiore diminuzione dello stesso in alta quota



POTENZA METABOLICA SOSTENIBILE

126

La locomozione umana

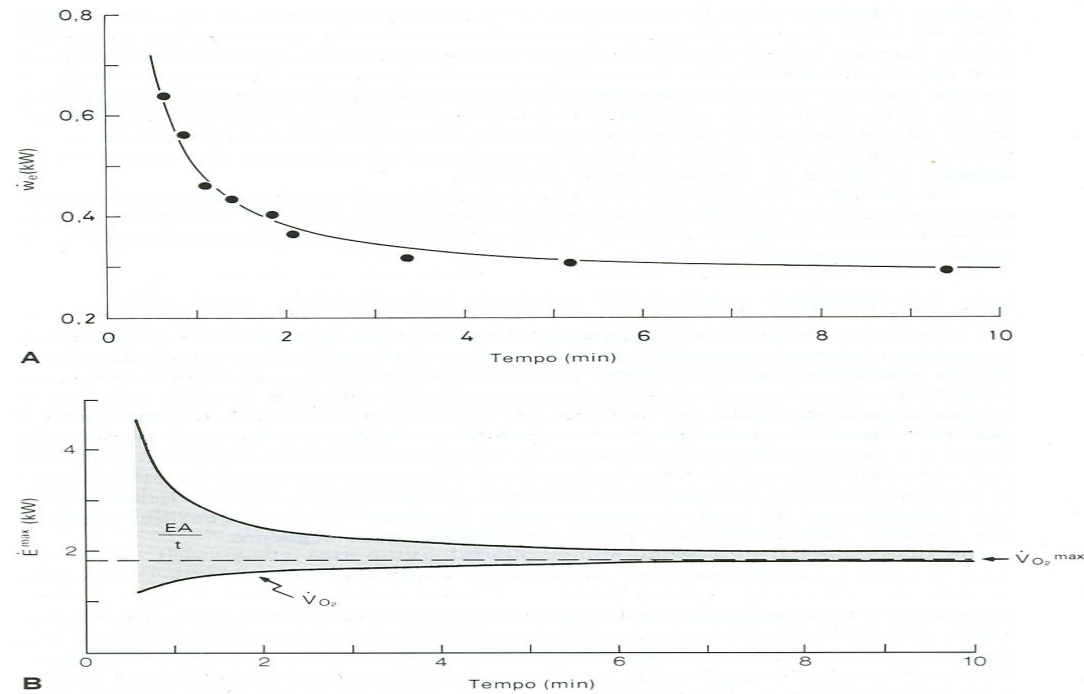
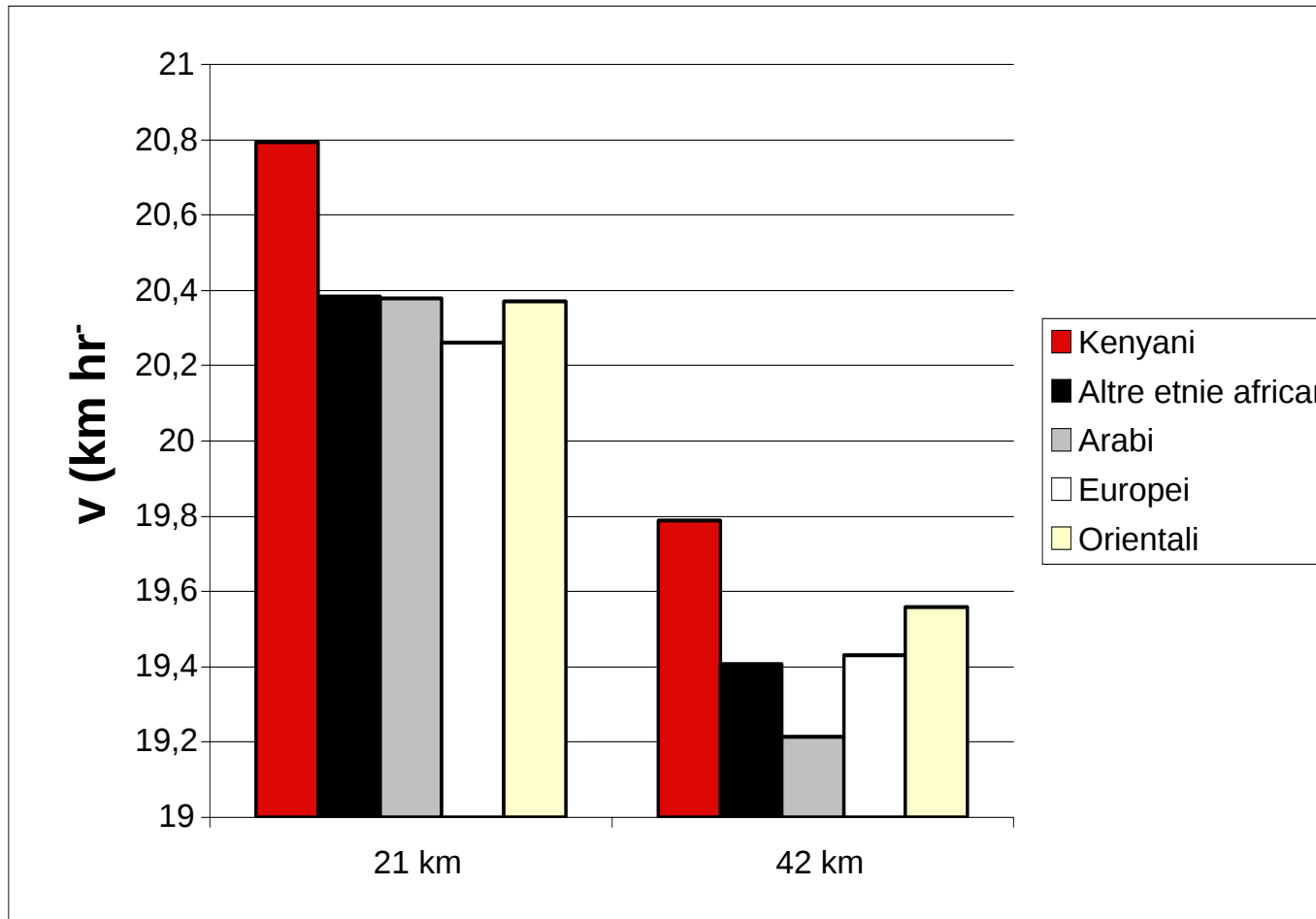


Fig. 9.1 A) Potenza massima sostenibile al cicloergometro ($\dot{w}_e$, kW) in funzione della durata dell'esercizio (min). La funzione che interpola i punti sperimentali è descritta da: $\dot{w}_e = 0,273 + 16/t - (0,273/t) \cdot (1 - e^{-t/\tau})$, dove $\dot{w}_e$ è in kW, t in s e $\tau = 10$ s (da Wilkie 1980). B) Massima potenza metabolica sostenibile ($\dot{E}^{max}$, kW), in funzione della durata della prova al cicloergometro (min) in un atleta di alto livello. La linea tratteggiata indica la potenza corrispondente al massimo consumo di O_2 ; la curva inferiore, la potenza media effettivamente sostenuta sulla base dei processi ossidativi. La distanza verticale tra la curva superiore e quella inferiore rappresenta quindi la potenza dovuta ai meccanismi anaerobici (lattacidi e alattacidi).

$$v'_{max} = (EA \cdot t - 1 + MPA - MPA \cdot \tau \cdot (1 - e^{-t/\tau}) \cdot t - 1) / C$$

Maratoneti Kenyani



Bibliografia

- *Philo U. Saunders, David B. Pyne, Richard D. Telford and John A. Hawley. **Factors Affecting Running Economy in Trained Distance Runners*** Sports Med 2004; 34 (7): 465-485
- *Laurent Bosquet, Luc Léger and Patrick Legros, **Methods to Determine Aerobic Endurance.*** Sports Med 2002; 32 (11): 675-700
- *di Prampero PE **Factors limiting maximal performance in humans.*** EJAP 2003 90: 420-429