



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Scienze Biomediche

Corso di Laurea Triennale in Scienze Motorie

Tesi di Laurea

**L'ALLENAMENTO IN ALTURA: ADATTAMENTI FISILOGICI E
METODOLOGIA DI ALLENAMENTO**

Relatore: Prof. Gerardo Bosco

Laureando: Nicola Orazio

N° di matricola: 1195903

Anno Accademico 2021/2022



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Scienze Biomediche

Corso di Laurea Triennale in Scienze Motorie

Tesi di Laurea

**L'ALLENAMENTO IN ALTURA: ADATTAMENTI FISIologici E
METODOLOGIA DI ALLENAMENTO**

Relatore: Prof. Gerardo Bosco

Laureando: Nicola Orazio

N° di matricola: 1195903

Anno Accademico 2021/2022

INDICE

1. INTRODUZIONE	3
1.1 Che cosa si intende per alta quota: suddivisione fisiologica e principali adattamenti fisiologici che si manifestano.....	4
2 PRINCIPALI APPLICAZIONI ALTITUDINE/ALLENAMENTO.....	6
2.1 Live High + Train High (LHTH).....	6
2.2 Live High + Train Low (LHTL).....	8
2.3 Live Low + Train High (LLTH).....	10
2.4 Principali sport che inseriscono l'alta quota nella periodizzazione dell'allenamento.....	11
3 L'IMPORTANZA DELL'ACCLIMATAZIONE E DELLA PERMANENZA IN QUOTA.....	13
3.1 Mal di montagna acuto (AMS).....	13
3.2 Edema polmonare da alta quota (HAPE).....	14
3.3 Edema cerebrale da alta quota (HACE).....	15
3.4 Corretta acclimatazione.....	15
4 L'ALLENAMENTO CONTRO RESISTENZA IN CONDIZIONI DI IPOSSIA.....	19
4.1 La risposta ipertrofica all'allenamento contro resistenza.....	19
4.2 Protocollo di allenamento a basso carico / alte ripetizioni.....	21
4.3 High – Resistance - Circuit training (HRC).....	23
5 L'ALLENAMENTO DI RESISTENZA IN CONDIZIONI DI IPOSSIA.....	25
5.1 Le risposte in atleti allenati.....	25
5.1.1 Effetti sulla ventilazione.....	26
5.1.2 Effetti cardiovascolari.....	27
5.1.3 Effetti ematologici.....	27
5.1.4 Effetti sul muscolo scheletrico.....	28
5.2 La periodizzazione dell'allenamento in altura per gli sport di endurance.....	29
6 CONCLUSIONI.....	33
7 BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA.....	35

1.Introduzione

Fino a pochi anni fa l'ambiente montano d'alta quota sopra i 2500 metri sul livello del mare risultava irraggiungibile ai più, rendendolo quasi esclusivamente frequentato da alpinisti esperti o dalle uniche popolazioni residenti in questi ambienti estremi. Ai giorni nostri, invece, l'ambiente d'alta montagna risulta più accessibile, grazie anche all'insediamento di nuove infrastrutture, come ad esempio impianti di risalita, piste di atletica o campi da calcio. Tutte queste migliorie hanno fatto sì che l'ambiente che prima veniva considerato difficilmente raggiungibile oggi si sia trasformato in un contesto molto più frequentato e accessibile a tutti, esperti e non, e soprattutto altamente sfruttato da atleti di diverse discipline sportive per sfruttarne i benefici derivanti dall'esposizione a tali contesti.

Di conseguenza, la maggior affluenza di persone in questi ambienti, correlata ad una minor difficoltà di raggiungimento dell'alta quota, ha spinto molti ricercatori a concentrare i loro studi sull'attività fisica e sulla permanenza in altura, focalizzandosi sugli adattamenti fisiologici che essa induce negli esseri umani ed evidenziandone soprattutto i possibili benefici o pericoli di esposizioni prolungate in questi ambienti.

Successivamente, grazie ai risultati dei primi studi scientifici¹, sempre più sport di squadra o individuali, hanno iniziato ad inserire fasi della periodizzazione dell'allenamento in ambienti ipossici, per sfruttarne gli adattamenti fisiologici con la finalità di migliorare le performance sportive degli atleti, sia durante fasi di off-season, che in periodi di in-season.

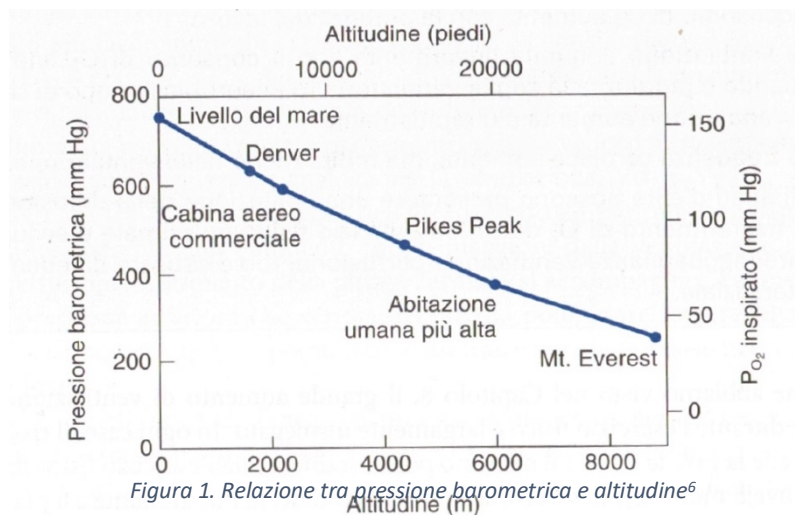
Lo scopo di questo lavoro di tesi è quello di individuare quali sono le metodologie di allenamento più funzionali che conducono a reali benefici e quali invece sono delle metodologie che non migliorano le performance atletiche.

1.1 Che cosa si intende per alta quota: suddivisione fisiologica e principali adattamenti fisiologici che si manifestano

Un ambiente può definirsi di medio-alta quota se rientra in un determinato range di altitudine sul livello del mare; secondo Bartsch, fisiologicamente si possono distinguere cinque livelli di quota²:

- A. Livello del mare, 0-500 metri s.l.m.
- B. Bassa quota, 500-2000 metri s.l.m.
- C. Media quota, 2000-3000 metri s.l.m.
- D. Alta quota, 3000-5500 metri s.l.m.
- E. Quota estrema, >5500 metri s.l.m.

Facilmente, l'alta quota può indurre delle complicanze sia acute che croniche ai soggetti che non riescono ad acclimatarsi rapidamente, non rispettando i corretti tempi di acclimatazione raggiungendo così quote elevate in tempi relativamente brevi, senza acclimatarsi a step intermedi; tale complicanze sono pressoché determinate dal fenomeno fisico tale per cui la pressione barometrica decresce in maniera quasi esponenziale con l'aumentare dell'altitudine; inoltre, un'altra grandezza fisica che decresce all'aumentare della quota e può indurre ulteriori risposte negative all'acclimatazione è la temperatura dell'aria, che può diminuire anche di 50 °C tra livello del mare e quota estrema.



Una
risposte

delle
più

importanti dell'acclimatazione è l'iperventilazione causata dalla stimolazione ipossica dei chemorecettori periferici. Sebbene i bassi valori di pCO₂ arteriosa e l'alcalosi risultante tendono ad inibire questo fenomeno, esso tenderà a ripresentarsi i giorni successivi in quanto, il rene tende ad aumentare la quota di basi escrete con le urine come meccanismo di compenso allo stato di alcalosi respiratoria; ciò fa sì che si normalizzi il pH ematico e che non venga più inibito il fenomeno dell'iperventilazione, che addirittura tenderà ad aumentare³.

Un'altra risposta all'acclimatazione alle grandi quote (superiori ai 2000 metri sul livello del mare) è la policitemia, ovvero l'aumento della concentrazione dei globuli rossi nel sangue. Il risultante aumento di concentrazione dell'emoglobina, e quindi della capacità di trasporto di O₂ fa sì che, sebbene siano diminuite la pO₂ arteriosa e la saturazione di O₂, il contenuto in O₂ del sangue arterioso possa essere normale o addirittura superiore allo stato basale. Questo adattamento è di fondamentale importanza fisiologica, basti pensare ad esempio come nelle popolazioni che risiedono stabilmente a 4600 metri di altitudine nelle Ande peruviane o gli Sherpa impiegati nelle spedizioni in Nepal, la pO₂ arteriosa sia di soli 45 mm Hg e la corrispondente saturazione arteriosa in O₂ soltanto del 81%, al fronte di un range tra il 95-100% al livello del mare; ciò, in soggetti non abituati ad esposizioni ipossiche, causerebbe una diminuzione considerevole del contenuto arterioso di ossigeno, che, negli Sherpa e negli abitanti delle Ande Peruviane, grazie alla policitemia, invece, determina un aumento di emoglobina da 15 a 19,8 g/100ml, con una concentrazione arteriosa di O₂ aumentata fino al 22,4 ml/100ml rispetto ai 15 ml/100 ml che si misurerebbero a livello del mare. Il principale stimolo

all'aumento della produzione di globuli rossi è l'ipossiemia, che innesca il rilascio da parte del rene di eritropoietina, la quale a sua volta stimola un aumento di attività del midollo osseo⁴, sede di eritropoiesi.

Esistono poi altri cambiamenti fisiologici ad alta quota: ad altezze moderate c'è uno spostamento a destra della curva di dissociazione dell'O₂, causata dall'aumento della concentrazione di 2,3-difosfoglicerato, sviluppato principalmente a causa dell'alcalosi respiratoria e che, come conseguenza, determina una miglior cessione dell'ossigeno a livello periferico.

Ad altitudini ulteriormente maggiori l'effetto dell'alcalizzazione supera quello del 2,3-difosfoglicerato e la curva di dissociazione si sposta a sinistra, aumentando l'affinità per l'ossigeno nei capillari polmonari. Anche il numero di capillari subisce variazioni, in particolare il numero per unità di volume aumenta nei tessuti periferici e le cellule subiscono variazioni degli enzimi ossidativi. Un'altra caratteristica fisiologica che varia all'aumentare dell'altitudine è la massima capacità respiratoria, che aumenta in quanto l'aria risulta essere meno densa, favorendo la ventilazione estremamente elevata (fino a 200 litri/min contro i 60 litri/min in condizioni normali sul livello del mare)⁵.

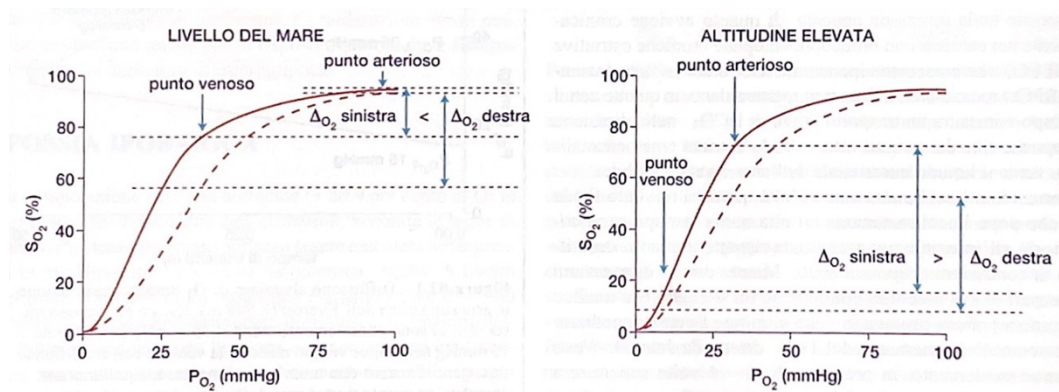


Figura 2. Effetti dello spostamento a destra e a sinistra della curva di dissociazione dell'ossiemoglobina, a livello del mare e ad altitudini elevate⁶.

2. Principali applicazioni altitudine/allenamento

Gli atleti élite di diverse discipline, sia individuali che di squadra, per diversi anni hanno inserito nella loro periodizzazione dell'allenamento periodi di lavoro in altura e in ipossia per cercare di migliorare le loro performance sportive.

Inizialmente esisteva un unico approccio che prevedeva sessioni di allenamento sport specifiche e permanenza alla stessa altitudine moderata, dai 1500 metri fino ai 4000 metri. Questa tecnica è ancora utilizzata ai giorni nostri, ma sono state implementate altre metodologie più ricercate.

2.1 Live High + Train High (LHTH)⁷

Questo protocollo di allenamento è il primo ad essere stato inserito nella periodizzazione e consiste nel vivere ed allenarsi a quote moderate. Il principale adattamento fisiologico che produce è l'incremento della massima potenza aerobica, reso possibile dalla carenza di intake di ossigeno, dovuto alla diminuzione della pressione barometrica degli ambienti di altura. Durante la performance, questa condizione di ipossia tende a stimolare la produzione di eritropoietina (EPO) da parte del rene. Come conseguenza, si manifesta l'aumento del volume cellulare dei globuli rossi e della concentrazione di emoglobina (Hb), stimolati dalla quantità maggiore di EPO prodotta rispetto a condizioni fisiologiche normali, e un accrescimento della concentrazione del 2,3-bifosfoglicerato (2,3-BPG); a loro volta, queste modificazioni fisiologiche inducono uno spostamento verso destra

della curva di dissociazione dell'ossiemoglobina (vedi fig.2). Come conseguenza finale si ha un miglioramento della capacità di cessione dell'ossigeno ai muscoli scheletrici e l'aumento del massimo consumo di ossigeno da parte dell'atleta.

Inoltre, la tecnica LHTH consente di aumentare anche l'attività del 3-idrossiacil-CoA deidrogenasi, determinando una accelerata mobilizzazione degli acidi grassi a favore di un risparmio di glicogeno muscolare per rispondere alla richiesta energetica derivante dall'allenamento.

D'altro canto, il protocollo LHTH può provocare anche delle conseguenze sfavorevoli per la performance sportiva: tende ad aumentare la viscosità del sangue, che talvolta può portare ad un diminuito flusso sanguigno a livello muscolare, induce un decremento della frequenza cardiaca massima sotto sforzo massimale e dell'attività enzimatica glicolitica, decrementando e riducendo l'attività glicogenolitica; inoltre potrebbe causare anche un decremento dell'attivazione dei recettori adrenergici e della sintesi proteica, fondamentale per il recupero muscolare post-allenamento. Se i volumi e l'intensità di allenamento sostenuti sono eccessivamente alti, poi, si potrebbe verificare uno stato di stress ormonale che costringerebbe l'atleta ad affrontare un periodo di recupero ad intensità e volumi minori, generando così una possibile diminuzione della performance sportiva e ottenendo il risultato opposto a quello ricercato.

2.2 Live High + Train Low (LHTL)⁸

Per ovviare all'eccessivo stress metabolico che si andrebbe incontro adottando la metodologia LHTH, attorno ai primi anni Novanta, il dr. Benjamin Levine e James Stray-Gundersen hanno studiato una nuova tecnica: Live High + Train Low. Questo protocollo prevede la permanenza in medio-alta quota (2000-3000 metri s.l.m.) durante le fasi di recupero e vita quotidiana, e la discesa sotto i 1500 metri durante le fasi di allenamento. Ciò dovrebbe simultaneamente esporre gli atleti ai benefici dell'acclimatazione agli ambienti ipossici e permettere il mantenimento della stessa intensità e volumi dell'allenamento a livello del mare, risultando ottimale come strategia per indurre gli adattamenti ematologici, neuromuscolari e metabolici atti a migliorare la performance.

A sua volta questa tecnica può prevedere un'altra possibilità per ovviare agli spostamenti tra alta e bassa quota naturale: durante le fasi di allenamento, infatti, l'atleta si mantiene ad altitudini elevate, sfruttando l'inalazione di ossigeno per simulare quote più basse, permettendo così di mantenere invariati i volumi e l'intensità senza spostarsi di quota.

Author	Subjects	Design	Key Results
Aughey et al. (6)	Well-trained cyclists and triathletes	LH + TL continuous (N = 12) Live at 2650 m, normobaric hypoxia 8–10 h d ⁻¹ for 20 d Train at 600 m, normobaric normoxia LH + TL intermittent (N = 10) Live at 2650 m, normobaric hypoxia 8–10 h d ⁻¹ 4 x 5 d (2 d at 600 m, between each 5 d) Train at 600 m, normobaric normoxia Control (N = 11) Live and train at 600 m, normobaric normoxia LH + TL (N = 6) Live at 3000 m, normobaric hypoxia 8–10 h d ⁻¹ for 23 d Train at 600 m, normobaric normoxia Control (N = 7)	↓ Skeletal muscle maximal Na ⁺ -K ⁺ -ATPase activity in LH + TL “continuous” after 5 d and remained unaltered (P < 0.05) ↓ Skeletal muscle maximal Na ⁺ -K ⁺ -ATPase activity in LH + TL “intermittent” after 5 d but returned to baseline values after 4 x 5 d (P < 0.05)
Aughey et al. (5)	Well-trained cross-country skiers, cyclists, and triathletes	Live and train at 600 m, normobaric normoxia LH + TL (N = 6) Live at 3000 m, normobaric hypoxia 8–10 h d ⁻¹ for 23 d Train at 600 m, normobaric normoxia Control (N = 7)	↓ Skeletal muscle maximal Na ⁺ -K ⁺ -ATPase activity (P < 0.05)
Kinsman et al. (30)	Trained endurance athletes	Live and train at 600 m, normobaric normoxia LH + TL continuous (N = 7) Live at 2650 m, normobaric hypoxia 8–10 h d ⁻¹ for 15 d Train at 600 m, normobaric normoxia LH + TL intermittent (N = 7) Live at 2650 m, normobaric hypoxia 8–10 h d ⁻¹ 3 x 5 d (2 d at 600 m, between each 5-d) Train at 600 m, normobaric normoxia Control (none reported)	↓ SpO ₂ in LH + TL “continuous” and LH + TL “intermittent” vs pre (P < 0.05) ↑ Sleep arousal and RDI in LH + TL “continuous” and LH + TL “intermittent” vs pre (P < 0.05) ↑ REM sleep in LH + TL “continuous” and LH + TL “intermittent” vs pre (P < 0.05)
Kinsman et al. (31)	Well-trained cyclists	Crossover design (N = 10) LH + TL Live at 2650 m, normobaric hypoxia 8–10 h d ⁻¹ for 1 d Train at 600 m, normobaric normoxia Control	HVR not correlated with sleep quality Stratified RDI may help identify potential sleep disturbances
Clark et al. (14)	Well-trained cyclists and triathletes	Live and train at 600 m, normobaric normoxia LH + TL continuous (N = 12) Live at 2650 m, normobaric hypoxia 8–10 h d ⁻¹ for 20 d Train at 600 m, normobaric normoxia LH + TL intermittent (N = 10) Live at 2650 m, normobaric hypoxia 8–10 h d ⁻¹ 4 x 5 d (2 d at 600 m, between each 5 d) Train at 600 m, normobaric normoxia Control (N = 11)	↓ Lactate production in high-intensity cycling in LH + TL “continuous” (P < 0.05) NSD skeletal muscle lactate metabolism LH + TL “continuous” and LH + TL “intermittent” NSD skeletal muscle buffer capacity LH + TL “continuous” and LH + TL “intermittent”
Saunders et al. (56)	Australian NT runners	Live and train at 600 m, normobaric normoxia LH + TL (N = 10) Live at 2000–3100 m, normobaric hypoxia 9–12 h d ⁻¹ 4 x 5 d (2 d at 600 m, between each 5 d) Train at 600 m, normobaric normoxia Control (N = 13) Live and train at 600 m, normobaric normoxia	NSD Hb mass Improvement in running economy (P < 0.05)
Roberts et al. (51)	Well-trained cyclists	LH + TL (N = 19) Live at 2650 m, normobaric hypoxia 8–10 h d ⁻¹ for 5, 10, or 15 d Train at 600 m, normobaric normoxia Control (N = 19) Live and train at 600 m, normobaric normoxia LH + TL (N = 5) Live at 2650 m, normobaric hypoxia 8–10 h d ⁻¹ for 12 d Train at 600 m, normobaric normoxia Control (N = 5)	NSD V _{O₂max} Improvement in MMPO _{4 min} (P < 0.05) Improvement in MAOD (P < 0.05)
Martin et al. (39)	Australian NT cyclists	Live and train at 600 m, normobaric normoxia LH + TL (N = 5) Live at 2650 m, normobaric hypoxia 8–10 h d ⁻¹ for 12 d Train at 600 m, normobaric normoxia Control (N = 5)	Improvement in MMPO _{4 min} (P < 0.05)
Townsend et al. (64)	Well-trained cyclists and triathletes	Live and train at 600 m, normobaric normoxia LH + TL continuous (N = 12) Live at 2650 m, normobaric hypoxia 8–10 h d ⁻¹ for 20 d Train at 600 m, normobaric normoxia LH + TL intermittent (N = 10) Live at 2650 m, normobaric hypoxia 8–10 h d ⁻¹ 4 x 5 d (2 d at 600 m, between each 5 d) Train at 600 m, normobaric normoxia Control (N = 11) Live and train at 600 m, normobaric normoxia	↑ HVR in LH + TL “continuous” and LH + TL “intermittent” (P < 0.05)
Gore et al. (19)	Well-trained cross-country skiers, cyclists, and triathletes	LH + TL (N = 6) Live at 3000 m, normobaric hypoxia 8–10 h d ⁻¹ for 23 d Train at 600 m, normobaric normoxia Control (N = 7)	↓ Skeletal muscle buffer capacity (P < 0.05) ↓ Submaximal V _{O₂} (P < 0.05) Improvement in cycling efficiency (P < 0.05)
Ashenden et al. (4)	Well-trained runners	Live and train at 600 m, normobaric normoxia LH + TL (N = 6) Live at 2650 m, normobaric hypoxia 8–11 h d ⁻¹ 3 x 5 d (3 d at 600 m, between each 5 d) Train at 600 m, normobaric normoxia Control (N = 5)	↑ sEPO (P < 0.05) NSD reticulocyte parameters NSD Hb concentration
Nummela and Rusko (44)	Finnish NT 400-m runners	Live and train at 600 m, normobaric normoxia LH + TL (N = 8) Live at 2200 m, normobaric hypoxia 16–17 h d ⁻¹ for 10 d Train at 10 m, normobaric normoxia Control (N = 10)	Improvement in 400-m-run TT (P < 0.05)
Ashenden et al. (2)	Well-trained cross-country skiers, cyclists, and triathletes	Live and train at 10 m, normobaric normoxia LH + TL (N = 6) Live at 3000 m, normobaric hypoxia 8–10 h d ⁻¹ for 23 d Train at 600 m, normobaric normoxia Control (N = 7)	NSD reticulocyte parameters NSD Hb mass
Ashenden et al. (3)	Australian NT cyclists	Live and train at 600 m, normobaric normoxia LH + TL (N = 6) Live at 2650 m, normobaric hypoxia 8–10 h d ⁻¹ for 12 d Train at 600 m, normobaric normoxia Control (N = 6) Live and train at 600 m, normobaric normoxia	NSD reticulocyte parameters NSD Hb mass

Tabella 1. Sommario delle principali ricerche relative all'utilizzo della metodologia LHTL negli sport di endurance⁹

2.3 Live Low + Train high (LLTH)¹⁰

La terza strategia di lavoro che sfrutta l'ipossia è la Live Low + Train High; consiste in temporanee esposizioni (5-180min) durante le fasi di allenamento o di recupero ad ambienti ipossici che simulano l'altura. Anch'essa, come la precedente, viene utilizzata per ricercare gli adattamenti fisiologici indotti dalla carenza di ossigeno, ma limitando l'esposizione ad ambienti ipossici per breve tempo. In particolare, esistono due metodologie principali: la prima utilizza la diluizione dell'azoto che permette la simulazione dell'altitudine di 2000-3000m in apposite camere ipossiche, situate sul livello del mare e sfruttate durante i periodi di recupero. Un sistema di ventilazione pompa aria composta dal 20.9% di O₂ e dal 79% di N₂ ed un gas composto dal 100% di azoto, trasformando così le concentrazioni di aria presente nella stanza approssimativamente in 15,3% O₂ e 84,7% N₂ (stesse concentrazioni misurabili ad un'altitudine di 2500 metri s.l.m.). La seconda possibilità è simile alla precedente: prevede, però, la filtrazione dell'ossigeno di particolari camere tramite apposite membrane, che riducono la concentrazione molecolare del gas, simulando l'ambiente ipossico; a differenza della prima strategia, l'atleta sfrutta tale camera per allenarsi in carenza di ossigeno, simulando l'altura.

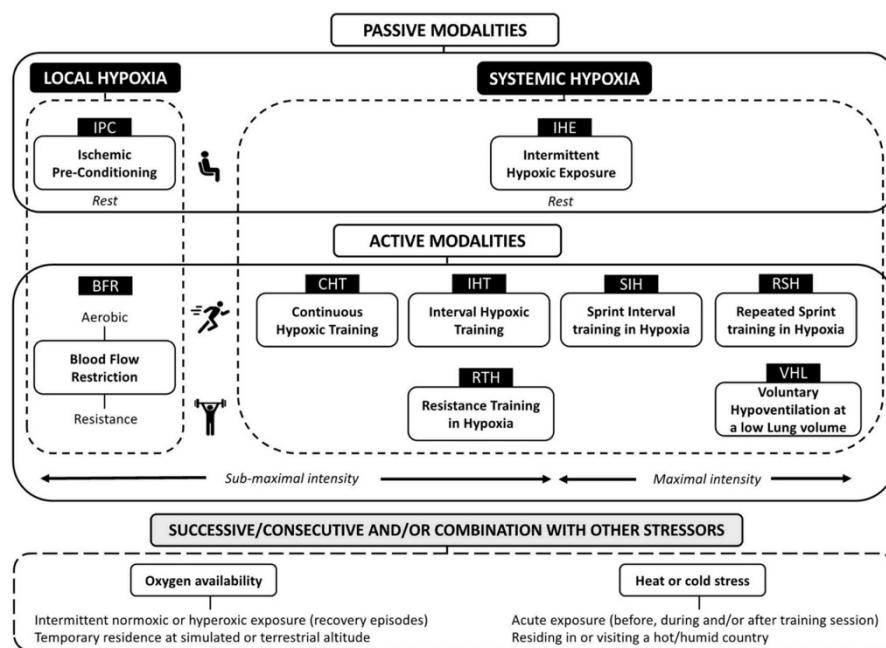


Figura 3 Schema principali metodi LLTH¹¹

2.4 Principali sport che inseriscono l'alta quota nella periodizzazione dell'allenamento

Subito dopo le prime evidenze scientifiche che mettevano in lustro i benefici di permanenze ed allenamenti in altura, sempre più atleti, indirizzati dai propri preparatori, hanno inserito regolarmente periodi in alta quota. In particolare, gli sport che ne hanno fatto uso e tutt'ora utilizzano tale metodologia sono prevalentemente gli sport di resistenza individuali. Negli ultimi anni, però, anche gli sport caratterizzati da performance esplosive e di breve durata, e gli sport di squadra, hanno iniziato ad utilizzare periodi di permanenza in ambienti ipossici.

Triatleti di lunghe distanze, ciclisti, maratoneti o ultramaratoneti, sciatori fondisti e nuotatori di lunghe distanze sono gli sportivi che più sfruttano l'allenamento ipossico; tendenzialmente, questi sport alternano le diverse metodologie, sia in fasi di off-season, quindi preparatorie, che in fasi di in-season lontane dalle competizioni, quindi fasi di recupero o mantenimento della fitness¹².

La tipologia di allenamento più utilizzata tra questi sport e che ha dimostrato di permettere l'incremento maggiore della performance sportiva è l'LHTL (live high-train low). Come illustra la tabella soprastante (tab. 1), sono numerosi gli studi che evidenziano come i benefici superino le possibili problematiche indotte dall'esposizione all'ipossia durante fasi di permanenza in alta quota, da parte di atleti di sport di endurance.

Negli ultimi cinque anni, grazie anche alle innovazioni tecniche, questi sport hanno pareggiato l'utilizzo della metodologia LHTL facente uso dell'altitudine naturale, con le metodologie LHTL che sfruttano la simulazione dell'altura, tramite inalazioni di gas ipossici, aprendo ad un numero ancora maggiore di atleti la possibilità di utilizzare tali tecniche.

Diversi studi recenti dimostrano come i principali adattamenti fisiologici indotti siano utili, oltre che per atleti di endurance, anche per atleti di discipline più brevi ed esplosive; queste discipline, a differenza degli sport di resistenza, tendono ad inserire i periodi di permanenza ad alta quota in fasi di off-season o pre-season, lontano dalle competizioni. Questa differenza, principalmente, è causata dall'impossibilità di riprodurre le intensità di allenamento, svolto in altura, simili

alle intensità della performance di gara a livello del mare, poiché gli svantaggi che si otterrebbero da tali sedute supererebbero i possibili benefici.

I principali sport che si possono definire non di resistenza e che ai giorni nostri utilizzano tali metodologie sono, ad esempio, il calcio, la pallavolo, l'hockey, il football americano, le discipline del nuoto di breve distanza, l'atletica veloce o di mediofondo o altre discipline acquatiche brevi come la canoa sprint. Gli atleti che praticano queste tipologie di sport, come gli atleti di sport di resistenza, utilizzano principalmente le tipologie di allenamento LHTL "naturale" o LHTL che simula l'altura, in modo tale da permettergli di non diminuire significativamente l'intensità di allenamento, non allontanandosi troppo da quelle che sono le performance di gara.

3. L'importanza dell'acclimatazione e della permanenza in quota

L'allenamento o la permanenza a quote superiori ai 2000-2500 metri sul livello del mare potrebbe comportare delle complicanze di salute comuni tra i soggetti che si recano occasionalmente in quota, trascurando la corretta acclimatazione. Alcuni di questi problemi sono trascurabili e si risolvono autonomamente nel corso di alcune ore o giorni; altri invece sono più gravi e possono indurre seri pericoli per la vita. Le principali e più pericolose complicanze legate ad una scorretta acclimatazione alla quota sono¹³:

- Mal di montagna acuto (AMS – Acute Mountain Sickness)
- Edema polmonare da alta quota (HAPE – High Altitude Pulmonary Edema)
- Edema cerebrale da alta quota (HACE – High Altitude Cerebral Edema)

3.1 Mal di montagna acuto (AMS)

Molti soggetti lamentano mal di montagna acuto nei primi giorni trascorsi oltre i 2500 metri sul livello del mare; ciò si manifesta più frequentemente nel caso in cui i soggetti siano saliti rapidamente in quota o abbiano iniziato gli allenamenti precocemente, non dando il tempo necessario allo sviluppo dei processi di acclimatazione.

I sintomi principali includono emicrania, senso di stordimento, stitichezza, contrazione della diuresi, vomito, nausea, disturbi alla vista, insonnia e una debolezza generale¹⁴. L'inizio dei sintomi si verifica generalmente già dalle prime 4-12 ore dopo l'arrivo in quota e i sintomi perdurano per pochi giorni, ma generalmente si verificano in ascese rapide e permanenze sopra i 3000 metri di quota, risultando di comune frequenza se le quote superano i 4000 metri¹⁵.

Un altro sintomo che si verifica spesso tra chi soffre di mal di montagna acuto è la mancanza di appetito dopo l'arrivo in quota, arrivando addirittura a far ridurre l'apporto calorico giornaliero del 40% in alcuni soggetti; tale complicanza non è da sottovalutare in quanto i substrati energetici utilizzati per sostenere il dispendio energetico variano, e se non venissero correttamente reintegrati si potrebbe ricorrere

ad una perdita della massa magra, fattore controproducente al miglioramento della performance¹⁶.

Inoltre, nei soggetti affetti da mal di montagna acuto, spesso, l'attività fisica anche di lieve intensità risulta insostenibile, costringendo così a giorni di inattività, ottenendo il risultato opposto a quello ricercato.

ALTITUDE	INCIDENCE (%)		
	MILD	MODERATE	SEVERE
2,130 m (7,000 ft)	20%-40%	0%-10%	0%
3,050 m (10,000 ft)	20%-30%	10%-20%	0%-10%
3,660 m (12,000 ft)	10%-40%	30%-40%	10%-20%
4,270 m (14,000 ft)	10%-30%	30%-60%	20%-30%
5,500 m (18,000 ft)	0%	10%-20%	>70%

Tabella 2 Incidenza dell'AMS in persone non acclimatate correttamente che raggiungono alte quote rapidamente da altitudini inferiori a 1500 metri sul livello del mare¹⁷

3.2 Edema polmonare da alta quota (HAPE)

Circa il 2% della popolazione che si espone a quote superiori ai 3000 metri, generalmente dopo 12-96 ore di permanenza in quota, presenta il quadro clinico di edema polmonare. Ciò comporta un travaso di liquido dal microcircolo verso i tessuti interstiziali polmonari e negli alveoli. Inizialmente i sintomi che si manifestano non sono gravi: senso di affaticamento generale, tosse secca anche persistente, dispnea nel corso dell'allenamento, dolore toracico, nausea, emicrania e una forte riduzione della diuresi¹⁸. I sintomi vanno via a via a peggiorare se il soggetto decide di continuare la permanenza in quota, o diminuiscono se scende a quote più basse o utilizza le camere iperbariche che simulano le pressioni di ossigeno riconducibili ad altitudini sotto i 1000 metri. È facilmente intuibile che gli atleti che soffrono di edema polmonare sono impossibilitati ad eseguire allenamenti anche di lievissima intensità, e sono costretti a periodi di stop forzato, andando a diminuire anche la performance sportiva.

3.3 Edema cerebrale da alta quota (HACE)

Questo quadro clinico è il più grave tra i tre, e se non trattato correttamente può essere tale da indurre coma o morte. I sintomi iniziali sono molto simili a quelli del AMS e dell'HAPE, ma risultano sin da subito più gravi: disturbi della visione, perdita di coordinazione neuro muscolare, perdita dei riflessi, emiparesi e stato confusionale generale si sommano ai sintomi di AMS e di HAPE¹⁹. Va riportato però che questa complicanza colpisce in media solo l'1% dei soggetti che si recano oltre i 2700m ed è causata dall'aumento della filtrazione di liquido dal microcircolo al tessuto interstiziale cerebrale, generando così un edema. Anche in questo caso, il soggetto che soffre di tale complicanza, deve essere riportato immediatamente a quote inferiori o deve essere sottoposto ad esposizioni in camere iperbariche, per limitare le conseguenze e permettere lo ristabilirsi della condizione di salute. È sottointeso che l'atleta che soffre di HACE sia impossibilitato ad allenarsi, e dovrà limitare il carico di allenamento per un periodo di tempo medio-lungo.

3.4 Corretta acclimatazione

Per acclimatazione si intendono tutti quegli adattamenti fisiologici che si sviluppano in un determinato tempo a seguito di esposizioni prolungate o intermittenti all'ipossia, che garantiscono lo stato di salute del soggetto²⁰.

Per gli atleti, quindi, è di fondamentale importanza riuscire ad acclimatarsi correttamente, in modo da evitare qualsiasi complicanza che andrebbe a limitare la possibilità di sopperire ad un carico di allenamento utile per migliorare la performance.

Uno studio²¹ ha evidenziato come ad altitudini superiori a 1500 metri sul livello del mare la ventilazione tende ad aumentare anche fino al settimo-nono giorno di permanenza, con l'incremento maggiore che si manifesta attorno al quinto giorno; inoltre, tale studio, ha paragonato i valori della saturazione dell'ossigeno a diverse altitudini di persone correttamente acclimate confrontati a valori di saturazione di ossigeno di persone non acclimate, riscontrando valori medi che con l'aumentare dell'altitudine risultano via a via più distanti tra loro (vedi tab.3 sottostante).

Altitude (m)	2,438	3,050	3,660	4,270
Unacclimatized	94% (90%-97%)	91% (85%-96%)	85% (75%-93%)	81% (72%-93%)
Acclimatized	94% (91%-98%)	92% (88%-97%)	91% (86%-97%)	89% (81%-95%)

Tabella 3 Valori di saturazione dell'ossigeno di soggetti acclimatati confrontati con i valori di saturazione di soggetti non acclimatati. Valori medi e (range)

Generalmente, per consentire una corretta acclimatazione, l'ascesa a quote elevate (>2000 metri sul livello del mare) deve avvenire per fasi in modo da evitare, o quanto meno limitare, le possibili conseguenze di una rapida ascesa a quote elevate. La divisione dell'ascesa in fasi deve essere proporzionale all'altitudine che si vuole raggiungere: mediamente, una persona che si muove da altitudini sul livello del mare e si sposta ad altitudini comprese tra i 1500 metri e i 2500 metri sul livello del mare, impiega dai 3 ai 7 giorni per acclimatarsi, e non sono necessarie fasi di acclimatazioni intermedie (vedi figura 4).

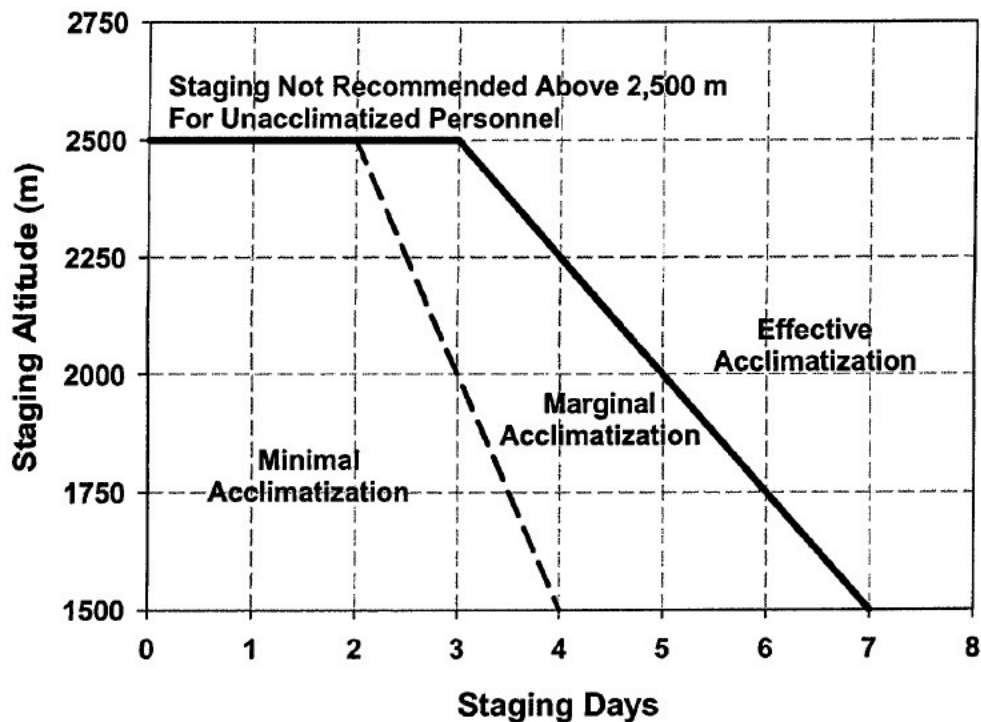


Figura 4 Combinazioni consigliate tra durata della sosta e altitudine da raggiungere per una corretta acclimatazione²²

Invece, se il soggetto intende portarsi ad altitudini maggiori, fino ai 4500 metri sul livello del mare, è fortemente consigliato dividere l'ascesa per step: la prima fase sarà l'acclimatazione a quote inferiori ai 2500 metri (dai 3 ai 7 giorni); dopodiché, una volta acclimatato, continuerà l'ascesa fino ai 3500 metri, dove trascorrerà altri giorni per permettere gli adattamenti fisiologici necessari a continuare la salita (dai 3 ai 7 giorni). Infine, si spingerà ad altitudine ancora più elevate, raggiungendo il target iniziale e scongiurando la possibilità di sviluppare AMS, HAPE o HACE²³. Esistono altre due tipologie di ascesa che permettono la corretta acclimatazione: una consiste nel salire di 150 metri al giorno, senza fasi di stallo ad altitudini fisse, la seconda consiste di salire di 300 metri al giorno, intervallando ogni due-quattro giorni delle fasi di permanenza all'altitudine raggiunta. Entrambe le strategie risultano essere valide per ridurre l'insorgenza di complicanze legate alla scorretta acclimatazione (vedi figura 5).

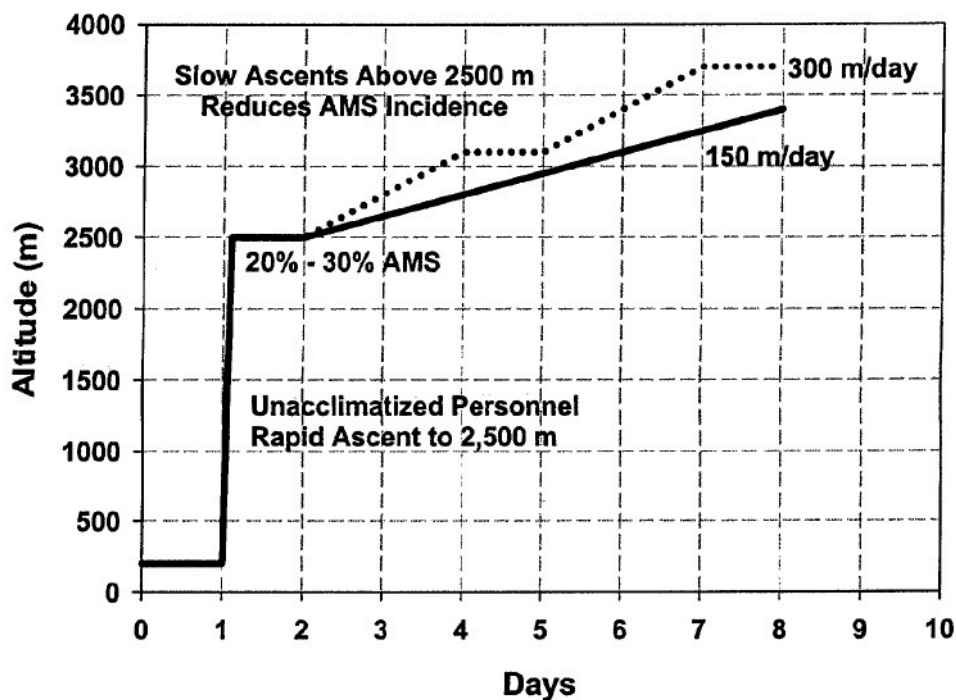


Figura 5 Profili di lenta ma costante ascesa giornaliera per velocizzare l'acclimatazione a quote superiori a 2500 metri sul livello del mare²⁴

È stato poi dimostrato che per velocizzare il processo di acclimatazione negli atleti che intendono svolgere periodi di allenamento in altura, sia utile nei primi giorni di esposizione all'ambiente ipossico, ridurre l'intensità di allenamento e la durata

degli stessi, limitandoli ad un'intensità vicina al 60% della frequenza cardiaca massima e ad una durata massima di un'ora²⁵.

Un'altra strategia per indurre un'acclimatazione corretta e rapida ad altezze superiori ai 2000 metri è l'esposizione intermittente all'ipossia tramite l'utilizzo di camere ipobariche; il protocollo prevede fasi che vanno dall'ora alle dodici ore di esposizioni all'ipossia, per periodi che vanno da una alle due settimane precedenti al periodo di permanenza e di allenamento in alta quota. In questo caso, esistono tre procedure principali di utilizzo²⁶:

- 1.5-4 h al giorno di esposizione ad una quota simulata compresa tra i 4000 e 4500 metri sul livello del mare; il soggetto in questo caso rimane sveglio e vigile.
- 7-16 h al giorno di esposizione ad una quota simulata compresa tra i 2000 e 3000 metri sul livello del mare; il soggetto in questo caso dorme.
- 0.5-1.5 h al giorno di esposizione ad una quota simulata compresa tra i 2250 e 3000 metri sul livello del mare; il soggetto in questo caso esegue un allenamento ad un'intensità pari al 60% della frequenza cardiaca massima.

A livello sportivo, il protocollo che induce l'acclimatazione migliore e permette sin da subito di praticare allenamenti in quota, risulta essere il terzo; esso deve avere una durata di almeno dieci giorni precedenti alla risalita in ambiente ipossico.

ALTITUDE ACCLIMATIZATION OUTCOME	IHE DURATION (h)	IHE DAYS	IHE ALTITUDE (m)	ACTIVITY DURING IHE
AMS Reduction	>1.5	>6	4,000-4,500	Rest, awake
AMS Reduction	>7	>3	2,000-2,500	Rest, sleep
Aerobic Performance Enhancement	1	>10	2,500-3,000	Aerobic exercise @ 50%-60% HRmax

Tabella 4 Tabella riassuntiva delle metodologie di esposizione in camera ipobarica per indurre l'acclimatazione²⁷

4. L'allenamento contro resistenza in condizioni di ipossia

Se inizialmente gli adattamenti fisiologici indotti dall'ipossia venivano sfruttati solo esclusivamente per migliorare le performance sportive aerobiche, negli ultimi dieci anni, sempre più atleti hanno iniziato a sfruttare l'altitudine per migliorare le performance sportive anaerobiche o di forza, sia esplosiva che resistente, utilizzando anche esercizi contro resistenza, ad alte ripetizioni e basso carico o a basse ripetizioni ed alto carico.

Con questo capitolo, analizzerò i possibili benefici di allenamenti contro resistenza, evidenziando la risposta muscolare ipertrofica e le variazioni dei valori di forza, confrontando tali miglioramenti con l'allenamento contro resistenza svolto in condizioni di normossia.

4.1 La risposta ipertrofica all'allenamento contro resistenza (carico >60% 1 RM)

È noto come l'ipertrofia e l'incremento della forza muscolare siano le conseguenze principali all'allenamento contro resistenza, ma dipendano direttamente dall'intensità dell'allenamento stesso; per avere dei risultati significativi, in termini di aumento di massa muscolare e forza, infatti, l'intensità minima dev'essere superiore al 60% di 1 RM²⁸. I meccanismi che stanno alla base di questi adattamenti muscolari includono diverse variabili: meccaniche, metaboliche, endocrine e neuronali. I fattori che maggiormente influenzano tali adattamenti sono di origine endocrina: in particolare, l'aumento della massa muscolare è strettamente legato alla secrezione dell'ormone della crescita (GH), che promuove l'anabolismo nel muscolo scheletrico²⁹. Si è poi visto come la secrezione di tale ormone tenda ad aumentare in risposta allo stimolo allenante contro resistenza svolto in condizioni di ipossia, risultando addirittura maggiore rispetto alla secrezione che si otterrebbe in condizioni di normossia³⁰. Come gli altri adattamenti fisiologici, anche l'aumento di secrezione di GH tende ad essere influenzato direttamente dall'altitudine a cui viene svolto l'esercizio fisico contro resistenza: in particolare, si ha un aumento significativo solo se l'ambiente ipossico in cui viene svolto

l'allenamento corrisponde alle condizioni fisiche riscontrabili ad un'altitudine superiore ai 3000 metri sul livello del mare³¹.

Lo studio condotto da Kazumichi Kurobe³² ha analizzato l'influenza di 8 settimane di allenamento contro resistenza, svolto in ambiente ipossico, sulla risposta ormonale, aumento di massa muscolare e forza in tredici soggetti adulti sani (6 soggetti hanno continuato a svolgere l'allenamento in condizioni di normossia, 7 di loro hanno svolto l'allenamento in condizioni ipossiche corrispondenti a 4000 metri di altitudine sul livello del mare). In particolare, sono stati analizzati i parametri muscolari sia in termini di forza che in termini di dimensione del muscolo tricipite brachiale e è stata monitorata la concentrazione ematica di GH al termine di ogni allenamento. Alla fine delle otto settimane, confrontando i risultati ottenuti con i dati raccolti precedentemente, è stato possibile evincere come le concentrazioni di GH ematico siano molto più alte nei soggetti che hanno svolto l'allenamento in condizioni ipossiche; inoltre, negli stessi soggetti, anche lo spessore muscolare, indice di ipertrofia, è risultato essere aumentato significativamente rispetto al gruppo di controllo (vedi fig. sottostante).

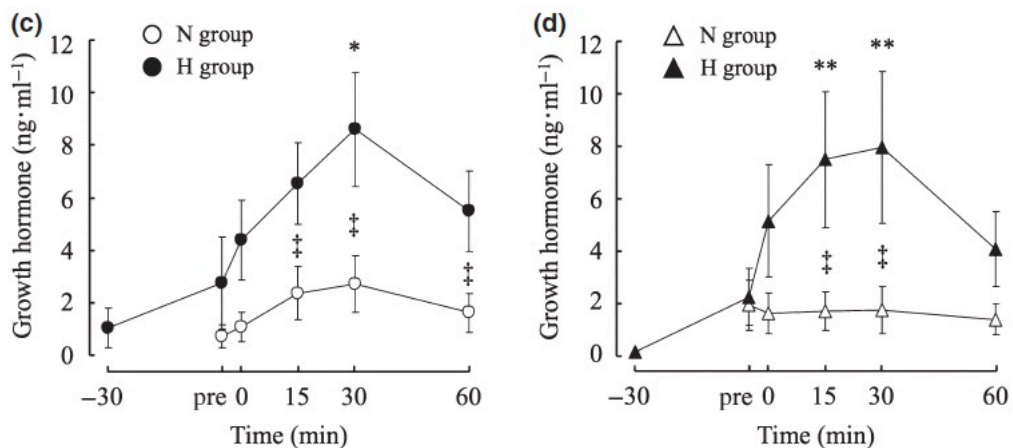


Figura 6 Confronto dei valori di GH presenti nel sangue tra la prima sessione di allenamento (c) e l'ultima sessione di allenamento (d) dei soggetti che hanno svolto l'allenamento in condizioni ipossiche (H group) e i soggetti che hanno svolto l'allenamento condizioni di normoxia (N group)³³

Lo studio citato ci permette quindi di affermare che l'allenamento contro resistenza, ad un'intensità superiore al 60% di 1 RM, risulti essere funzionale per incrementare la secrezione di GH, che induce a sua volta l'aumento ipertrofico del muscolo scheletrico, strettamente correlato al miglioramento della forza muscolare.

4.2 Protocollo di allenamento a basso carico/alte ripetizioni

Generalmente gli atleti di diverse discipline sportive, sia di endurance che discipline esplosive e di breve durata, inseriscono nei loro allenamenti sedute di esercizi contro resistenza eseguiti con bassi carichi ad alte ripetizioni. Storicamente, molti studi hanno indagato sui possibili benefici derivanti da allenamenti contro resistenza con carichi elevati e basse ripetizioni, ma pochi hanno tenuto conto della rarità con cui questa metodologia viene inserita nei piani di allenamento dei vari atleti. Di conseguenza, si è voluto indagare i possibili benefici ottenibili da allenamenti contro resistenza eseguiti con bassi carichi e alte ripetizioni. In particolare, lo studio condotto da Friedmann et. Al.³⁴, ha voluto analizzare le risposte funzionali, strutturali e molecolari del muscolo scheletrico post allenamento in ambiente ipossico e recupero in ambiente con condizioni di normossia; scopo dello studio era indagare se l'allenamento contro resistenza e svolto in ambiente ipossico intermittente potesse indurre un aumento dell'ipertrofia muscolare, variare dei marker del mRNA e cambiare le porzioni delle fibre muscolari. 19 soggetti maschi hanno svolto per un periodo di quattro settimane, per tre volte a settimana, un protocollo di allenamento prestabilito e basato su bassi carichi ed alte ripetizioni; 10 di loro lo hanno svolto in condizioni di ipossia che simulavano tramite inalazioni di N₂ una quota di 4500metri sul livello del mare, i restanti 9 soggetti invece hanno eseguito l'allenamento in condizioni di normoxia. I risultati ottenuti hanno evidenziato come la capacità di forza resistente, la forza massima e dimensione della sezione delle fibre muscolari non abbia subito differenze rilevanti tra il gruppo che ha svolto l'allenamento in ipossia e il gruppo di controllo (tabella 5).

	Test	Hypoxia	Normoxia
Strength endurance capacity (J/kg)	before	56.0±11.4	59.6±7.3
	after	60.5±10.6*	64.7±7.2*
Maximal strength (Nm/kg)	before	2.7±0.4	2.8±0.4
	after	2.8±0.5	2.9±0.3
MCSA (cm ²)	before	91.2±11.2	87.4±14.2
	after	91.4±11.7	88.4±15.0

**P*<0.05 vs. before training

Tabella 5 Confronto tra capacità forza resistente, forza massima e sezione delle fibre muscolari nei due gruppi pre e post protocollo di allenamento³⁵.

Anche nella distribuzione del tipo di fibre muscolari non si notano particolari differenze al termine del protocollo di allenamento tra i soggetti test e il gruppo di controllo (tabella 6).

Fibre types	Test	Hypoxia	Normoxia
Fibre type distribution (%)			
Type I	before	47.5±21.8	50.0±12.4
	after	45.1±20.5	50.5±9.4
Type IIC	before	0.8±1.1	0.1±0.1
	after	0.2±0.3	0.1±0.2
Type IIA	before	28.4±10.5	33.1±6.6
	after	35.2±11.5	38.0±6.7
Type IIAX	before	1.9±2.3	3.4±3.4
	after	3.0±3.6	0.9±1.4
Type IIX	before	20.4±15.2	13.4±9.9
	after	16.6±16.5	10.8±7.1
Fibre cross-sectional area (µm²)			
Type I	before	4368±1097	4298±1710
	after	4445±947	5525±428
Type IIA	before	5517±890	5458±2536
	after	5227±735	6193±1598
Type IIX	before	5004±1062	4282±2219
	after	4632±576	4804±720
Mean	before	4727±854	4631±1937
	after	4606±744	5709±1380

Tabella 6 Variazione della tipologia di fibre muscolari nei due gruppi pre e post protocollo di allenamento³⁶.

Questo studio ci permette quindi di trarre la conclusione che il protocollo di allenamento basato su bassi carichi e alte ripetizioni svolti in ambiente ipossico, non risulta essere efficace quanto i protocolli di allenamento che prevedono basse ripetizioni e carichi che si avvicinano al 1 RM. Di conseguenza, se l'obiettivo generale dell'atleta è quello di sviluppare maggior forza e aumentare la percentuale di massa magra nel periodo di permanenza in altura, è preferibile strutturare l'allenamento utilizzando il protocollo basse ripetizioni/alto carico, così da stimolare la maggior secrezione di GH che tenderà ad indurre l'aumento ipertrofico e di forza ricercato.

4.3 High-Resistance circuit training (HRC)

Una delle metodologie di allenamento più utilizzate dai vari atleti per migliorare le performance sportive, in particolare incrementare i valori di forza, è sicuramente l'high-intensity resistance circuit training (HRC). Questa tipologia di allenamento, oltre a migliorare la performance cardiorespiratoria e neuromuscolare o agire a livello della composizione corporea diminuendo la percentuale di massa grassa, è utile per aumentare l'ipertrofia muscolare e sviluppare valori di forza e potenza più elevati³⁷. Negli ultimi anni, alcuni ricercatori, hanno applicato l'ipossia al protocollo HRC, andando ad analizzare i possibili benefici o complicanze.

In particolare, lo studio condotto da Domingo J. Ramos Campo et. Al³⁸, ha preso in esame dodici soggetti maschi con una passata esperienza di esercizio contro resistenza, che per tre settimane sono stati sottoposti ad allenamenti a circuito contro resistenza in condizioni di normossia, ipossia moderata (simulando un'altitudine di 2100 metri sul livello del mare) e ipossia severa (simulando un'altitudine di 3800 metri sul livello del mare). I risultati ottenuti sono stati chiari: la frequenza cardiaca e l'RPE non hanno subito variazioni significative tra le tre tipologie di ambiente in cui si sono svolti gli allenamenti (tabella 7).

	Heart rate (b·min ⁻¹)			RPE		
	NORM	MH	HH	NORM	MH	HH
Basal	66.7 ± 8.2	66.9 ± 10.3	64.4 ± 8.6	6.0 ± 0.0	6.0 ± 0.0	6.0 ± 0.0
Block 1	150.9 ± 15.4	151.7 ± 11.4	153.0 ± 24.0	12.1 ± 1.8	12.6 ± 2.0	14.2 ± 3.1
Block 2	146.3 ± 15.4	149.3 ± 14.7	149.7 ± 17.3	11.6 ± 1.2‡	11.9 ± 1.9	13.82 ± 2.5§

*NORM = normoxia; MH = moderate hypoxia (0.16% fraction of inspired oxygen); HH = high hypoxia (0.13% fraction of inspired oxygen).

†Data are presented as mean ± SD.

‡Significant differences between NORM and HH.

§Significant differences between MH and HH ($p \leq 0.05$).

Tabella 7 Valori di FC e RPE riscontrati durante allenamenti a circuito contro resistenza in differenti ambienti³⁹

A differenza della FC e dell'RPE, il picco di forza e la forza media rilevate in tre set di panca piana ha subito variazioni significative tra le rilevazioni ottenuti in ambiente ipossico moderato e severo (tabella 8).

	Mean force (N)			Peak force (N)		
	NORM	MH	HH	NORM	MH	HH
Set 1	666.9 ± 278.2	654.5 ± 205.5	490.5 ± 205.5	879.9 ± 342.0	837.7 ± 335.9	633.9 ± 256.9
Set 2	636.7 ± 213.2	584.7 ± 136.6	497.7 ± 206.3	822.7 ± 236.0	763.5 ± 156.3	666.7 ± 262.2
Set 3	534.7 ± 216.6	563.5 ± 146.0	372.5 ± 274.2‡	682.6 ± 269.7	724.9 ± 173.9	487.5 ± 352.8‡

*NORM = normoxia; MH = moderate hypoxia (0.16% fraction of inspired oxygen); HH = high hypoxia (0.13% fraction of inspired oxygen).

‡Data are presented as mean ± SD.

‡Significant differences between moderate and high hypoxia ($p \leq 0.05$).

Tabella 8 Valori di forza media e picco di forza misurati in tre set di panca piana in differenti ambienti⁴⁰

Nello studio citato è stato inoltre messo in evidenza come il massimo consumo di ossigeno e il costo energetico dei vari esercizi svolti nel circuito di allenamento, subiscano variazioni significative in relazione alla tipologia di ambiente in cui si svolge l'allenamento (tabella 9); in particolare, il fattore più importante è la variazione di consumo di ossigeno e del costo energetico che l'atleta è costretto a impiegare dopo aver svolto la seduta di allenamento. Ciò fa sì che tale metodologia di allenamento, sia molto utile per atleti che necessitano di una ricomposizione corporea, basata sulla perdita di massa grassa e aumento della massa muscolare.

	Energy cost (kJ·min ⁻¹)			V _{O₂} (ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹)		
	NORM	MH	HH	NORM	MH	HH
Basal	8.2 ± 1.7	8.2 ± 1.4	8.4 ± 1.1	5.6 ± 1.1	5.6 ± 0.8	5.7 ± 0.7
After training	10.4 ± 1.8	11.7 ± 2.2‡	13.3 ± 2.8§	7.1 ± 0.9	7.9 ± 1.2‡	9.1 ± 2.1§

*NORM = normoxia; MH = moderate hypoxia (0.16% fraction of inspired oxygen); HH = high hypoxia (0.13% fraction of inspired oxygen).

‡Data are presented as mean ± SD.

‡Significant differences between NORM and MH ($p \leq 0.01$).

§Significant differences between NORM and HH.

Tabella 9 Valori di costo energetico e VO₂ registrati durante l'allenamento in differenti ambienti⁴¹

Questo studio ci permette quindi di dedurre come questa nuova metodologia di allenamento possa influenzare la performance sportiva degli atleti, andando a modificare diverse variabili fisiologiche e la percezione del carico di allenamento tra i diversi ambienti; questa tipologia di allenamento, risulta essere ottimale per atleti che hanno già una buona base di resistance training, in quanto è molto impattante a livello fisiologico e non sarebbe sostenibile da soggetti non allenati. È di fondamentale importanza inserirla anche nella programmazione di atleti di endurance o di sport di squadra, in fasi lontane dalle competizioni, sfruttandone soprattutto i benefici per la ricomposizione corporea.

5. L'allenamento di resistenza in condizioni di ipossia

Come è già emerso in precedenza, l'allenamento in altura è diventato parte integrante della preparazione atletica moderna, specialmente per le discipline sportive di endurance come le brevi e lunghe distanze di corsa o di ciclismo, spopolando in modo molto rapido sia tra gli atleti élite che tra gli atleti amatori o delle squadre giovanili.

Non sono ancora ben definiti i possibili benefici o le possibili complicanze dell'allenamento di resistenza in condizioni di ipossia.

5.1 Le risposte in atleti allenati

La pressione parziale dell'ossigeno nel sangue arterioso (PaO_2) decresce direttamente con l'aumentare dell'altitudine, a causa della progressiva diminuzione della pressione barometrica. Ad esempio, a 2000 metri sul livello del mare la PaO_2 decresce di circa 100mmHg rispetto alla pressione presente al livello del mare, causando una riduzione della saturazione di ossigeno nell'emoglobina, andando a sviluppare una serie di risposte fisiologiche per compensare questa situazione di stress ipossico⁴². Il fattore centrale di questi adattamenti è l'hypoxia-inducible-factor (HIF), fattore di trascrizione e regolatore principale dell'omeostasi dell'emoglobina⁴³; l'HIF in condizioni di normossia viene velocemente degradato, risultando non rilevabile, mentre, in condizioni di ipossia la degradazione rallenta in maniera significativa, consentendo una maggiore emivita e garantendo l'attivazione dei suoi geni trascrizionali per l'eritropoietina (EPO) e altre molecole, ottenendo come risultato una maggiore ossigenazione dei tessuti e limitando così il danno muscolare causato dall'allenamento in ipossia⁴⁴.

Questo adattamento principale fornisce il razionale fisiologico per l'allenamento in altura per atleti di sport di resistenza, diventando la base per gli adattamenti ventilatori, cardiovascolari, ematologici e muscolari.

5.1.1 Effetti sulla ventilazione

Le condizioni di ipossia vengono rilevate dai chemocettori periferici, situati nei glomi carotidei e aortici; essi rispondono alla diminuzione di PaO_2 , che innesca la trasduzione del segnale che comporta il rilascio di neurotrasmettitori (probabilmente dopamina) da parte delle cellule dei glomi. Le molecole di neurotrasmettitore si legano ai recettori post-sinaptici e generano il potenziale d'azione, che viene condotto dalle fibre del nervo glossofaringeo verso i centri del controllo del respiro posti a livello bulbare⁴⁵. Nel bulbo vengono integrati i diversi segnali e generati impulsi nervosi diretti ai muscoli della respirazione, atti a modificare il pattern respiratorio, in questo caso aumentando la frequenza respiratoria.

Si può affermare quindi che i chemocettori periferici sono responsabili dell'aumento della ventilazione in risposta all'ipossiemia arteriosa.⁴⁶ Tale risposta ventilatoria risulta fondamentale durante l'allenamento in altura, in quanto, l'iperventilazione fa aumentare la PaO_2 , mentre causa una riduzione della PaCO_2 portando ad un quadro di alcalosi respiratoria e spostando la curva di dissociazione dell'ossiemoglobina verso sinistra, consentendo di aumentare il carico di ossigeno trasportato nei polmoni.

Va evidenziato però che gli adattamenti ventilatori indotti dall'altura, non riescono a compensare completamente l'effetto dell'ipossia per due motivi principali: il trasferimento dell'ossigeno dall'atmosfera ai polmoni viene limitato durante l'esercizio fisico in altura, a causa di un ridotto gradiente di diffusione della pO_2 , e, sempre durante l'allenamento in condizioni ipossiche, aumenta anche il rapporto di ventilazione / perfusione (V/Q), attribuito molto probabilmente alla vasocostrizione⁴⁷. Di conseguenza, in condizioni di altitudine sopra i 2000 metri sul livello del mare, le prestazioni atletiche in sport di endurance sono ridotte, ma gli adattamenti ventilatori che si inducono possono avere implicazioni positive per le performance sportive quando l'atleta ritorna al livello del mare: in particolare, una volta tornati in condizioni di normossia, gli atleti presentano un aumento della PaO_2 e un migliore afflusso di ossigeno nei tessuti durante l'esercizio fisico⁴⁸.

5.1.2 Effetti cardiovascolari

In condizioni di altitudine, sopra i 2000 metri sul livello del mare, viene attivata una risposta simpatica per mantenere la perfusione dell'ossigeno ai tessuti in presenza di ipossiemia. L'ipossia influenza in modo diretto il rilascio di catecolamine nella midollare del surrene e tende a ridurre anche il tono vascolare sistemico, causando una stimolazione barorecettoriale del tronco encefalico e un aumento dell'attività simpatica⁴⁹. Dopo l'acclimatazione, la gittata cardiaca massima durante l'esercizio (CO_{max}) tende a ridursi, molto probabilmente a causa di diversi fattori: si manifestano una riduzione dell'attività simpatica o della sensibilità alla catecolamine, un aumento della stimolazione parasimpatica del tessuto cardiaco, una depressione miocardica dovuta a un ridotto apporto di ossigeno, una perdita di volume plasmatico con conseguente riduzione del ritorno venoso, un aumento della viscosità del sangue, un aumento della resistenza periferica e dall'ipertensione indotta dall'esercizio fisico⁵⁰. La riduzione del flusso sanguigno muscolare, dovuto ad una gittata cardiaca ridotta, tende a limitare di conseguenza anche l'apporto di ossigeno ai muscoli, riducendo così anche il massimo consumo di ossigeno (VO_{2max})⁵¹; ciò ha come conseguenza il fatto che l'atleta sia costretto a diminuire sia l'intensità che il volume di allenamento e a lungo andare potrebbe andare in contro a delle fasi di peggioramento della performance o addirittura di detraining.

5.1.3 Effetti ematologici

Gli adattamenti ematologici indotti dall'ipossia sono considerati la componente più importante dell'allenamento in altura. In risposta all'ipossia, HIF-1 induce la trascrizione del gene EPO⁵², prodotta principalmente nei reni, la quale promuove l'eritropoiesi nel midollo osseo, inducendo un aumento della percentuale di globuli rossi presenti nel sangue con il conseguente miglioramento di trasporto dell'ossigeno nel sangue⁵³. Generalmente la concentrazione di EPO presente nel sangue raggiunge un picco tra il primo e il quinto giorno dall'esposizione all'ipossia, ma questo dato risulta essere molto variabile tra atleta ed atleta. La

maggior parte degli studi classifica, di conseguenza, i fenotipi degli atleti in “responder” o “non responder”, sulla base di questa variabilità individuale⁵⁴.

Questo aumento della concentrazione di globuli rossi nel sangue tende a ritornare a valori nella norma dopo un periodo passato ad altitudini sul livello del mare e di durata variabile e differente per ogni atleta. Fondamentale è quindi programmare l’allenamento e il rientro a quote sul livello del mare, in modo da non far coincidere il periodo di competizioni con la perdita della massa dei globuli rossi, che andrebbe a far svanire l’effetto positivo ottenuto con l’allenamento ad alta quota⁵⁵.

Purtroppo, non esistono prove sufficienti per stabilire un rapporto di causa-effetto tra aumentata eritropoiesi e miglioramento della performance di resistenza; gli studi, infatti, variano notevolmente in termini di durata all’esposizione all’ipossia, contenuto dell’allenamento, metodologie di allenamento e livello di abilità dei soggetti, il che rende difficile constatare i reali benefici ematologici registrati nei diversi studi e che potrebbero essere correlati ad un miglioramento della performance.

Adirittura, il ruolo dell’aumento di emoglobina nel periodo post allenamento in altura è messo ancora più in discussione dall’osservazione dello studio condotto da Beall Cm et. Al.⁵⁶ che ha analizzato come gli atleti etiopi nativi in alta quota non mostrano significativi aumenti di EPO, dell’emoglobina o della saturazione dell’ossigeno rispetto a valori normali registrati sul livello del mare. È quindi possibile che le loro straordinarie capacità di prestazione derivino da adattamenti non ematologici ma da una migliore capacità dell’assorbimento dell’ossigeno⁵⁷.

5.1.4 Effetti sul muscolo scheletrico

L’allenamento di resistenza in altura induce una riduzione dell’ossigeno intramuscolare, causando così dei cambiamenti specifici nella trascrizione genica, nell’economia del metabolismo muscolare e nella capacità tampone. In particolare, durante un periodo di allenamento di sei settimane in esposizioni intermittenti di ipossia, è stato registrato un aumento del mRNA del trasportatore del GLUT-4 nel muscolo scheletrico, il quale facilita un assorbimento più duraturo del glucosio durante l’esercizio di endurance⁵⁸.

In maniera analoga, l'esercizio di endurance svolto in ambiente ipossico, induce a livello muscolare la formazione di nuovi capillari (angiogenesi), come conseguenza ad un aumento di angiogenina, interleuchina-8 e fattore di crescita endoteliale⁵⁹.

Un altro miglioramento che induce l'allenamento di resistenza ipossico è l'aumento della densità mitocondriale e della concentrazione di enzimi ossidativi, inducendo così un miglioramento:

- della capacità ossidativa del muscolo;
- dell'espressione delle proteine delle fibre muscolari a contrazione lenta;
- del fenotipo a contrazione lenta;
- del processo di accoppiamento contrazione-eccitazione;
- dell'economia del metabolismo muscolare⁶⁰.

Come ultimo adattamento si ha un aumento della "capacità tampone" del muscolo, legata all'aumento dei trasportatori di mono-carbossilato che gestiscono il lattato e gli enzimi adibiti all'anidrasi carbonica; tuttavia, non è ancora chiaro se l'acidosi muscolare svolga un ruolo importante nello sviluppo della fatica muscolare, quindi questo adattamento fisiologico non risulta essere di fondamentale importanza per il miglioramento delle prestazioni di resistenza⁶¹.

Infine, è utile sottolineare come questi adattamenti fisiologici inducono miglioramenti della performance quando gli atleti si allenano in ambienti ipossici e successivamente ritornano in condizioni di normossia; al contrario, l'esposizione prolungata continua all'ipossia ha effetti deleteri sul tessuto muscolare, andando incontro a lungo andare ad atrofia muscolare⁶².

5.2 La periodizzazione dell'allenamento in altura per sport di endurance

Pianificare il programma di allenamento per atleti élite di sport di resistenza in modo da massimizzare le performance risulta essere un compito molto complesso, soprattutto se all'interno di tale programmazione si devono inserire delle fasi di allenamento in altura. Molti consigliano di adattare l'allenamento di resistenza in altura in base agli appuntamenti più importanti nel corso della stagione,

pianificandolo in modo tale da svolgere il 18-25% del volume annuale totale di allenamento in condizioni ipossiche⁶³. È dimostrato come gli adattamenti fisiologici siano direttamente influenzati dal tempo di permanenza in altura e come il periodo ottimale sia della durata di tre settimane; nonostante questo anche periodi di due settimane in altura, intervallate da settimane di allenamento a livello del mare, conducono ad un miglioramento della performance paragonabile agli outcome ottenuti da permanenze più lunghe. La strategia di aumentare la permanenza in altura con l'intervallarsi di periodi brevi risulta molto utile agli atleti, in quanto è possibile massimizzare lo stimolo eritropoietico e tutti gli altri adattamenti fisiologici, ed allo stesso tempo massimizzare anche la qualità di allenamento che non sarebbe riproducibile in periodi prolungati di permanenza in alta quota⁶⁴.

È stato poi raccomandato⁶⁵ che l'esecuzione dei training camp in altura nell'arco di una stagione siano intervallati da periodi prolungati superiori alle otto settimane a livello del mare; questo permette di sfruttare le maggiori capacità acquisite in altura, garantendo il recupero sia fisico che mentale agli atleti prima del successivo camp⁶⁶.

I programmi di allenamento specifici per ogni sport di endurance durante i periodi di altura devono essere individuali e differenziati per ogni atleta, rispettando sia gli obiettivi personali che il calendario delle competizioni, tenendo conto anche delle esperienze pregresse di allenamento in altitudine. Un esempio di programmazione di allenamento specifico per sport di endurance è riportato nella tabella sottostante (vedi tabella 10).

Altra strategia di lavoro consigliata prevede per permettere un corretto recupero e massimizzare la performance sportiva, prevede carichi importanti di allenamento, sia in senso di volume che di qualità, nel periodo lontano dalle competizioni, mentre nel periodo pre-competizione è prevista la riduzione di tale carico, eseguendo allenamenti a bassa o moderata intensità in altitudine, ma completando gli allenamenti con delle sessioni ad alta intensità ad altitudini più basse, per riprodurre le situazioni di gara⁶⁸.

Uno dei problemi principali per gli allenatori e gli atleti che partecipano ai training camp in altura è la tempistica ideale per il ritorno prima della competizione. Wachsmuth et. Al.⁶⁹, tramite dei loro studi svolti su atleti di resistenza, hanno suggerito che l'emoglobina presente nel sangue, lo stato di salute generale e il tempo trascorso dal rientro dall'altitudine abbiano avuto degli effetti significativi sulla performance di gara; in media, il 47% della massa di emoglobina guadagnata in un periodo di permanenza di tre settimane in altura è stato perso dopo aver trascorso 24 giorni sul livello del mare, e, sebbene la massa di Hb sia correlata al VO₂Max, ha avuto solo un piccolo effetto positivo sulle prestazioni natatorie, che sono aumentate solo 25-35 giorni dopo il ritorno dall'altitudine. Sulla base di queste osservazioni, è stato raccomandato di programmare il ritorno dai campi di allenamento in quota 3-5 settimane prima di importanti competizioni, e precedere tali eventi con una fase di tapering, ovvero di riduzione del volume allenato utile al recupero muscolare. Non esiste però una regola fisiologica precisa che delimita un

Week	Overall volume	Intensity	Rest during intervals
Week pre-altitude at sea level	↓ compared to normal—'mini-taper' to reduce fatigue prior to camp [53, 54]	Normal	Normal
Week 1	<i>Initial athlete altitude sojourn/conservative approach:</i> first 2–3 days—25% ↓ from full sea-level volume Can ↑ frequency from normal (e.g., longer session split into 2 shorter sessions) Last 4 days = normal <i>Altitude-experienced athletes:</i> emerging data suggest elite athletes can tolerate high training volumes upon immediate ascent to altitude [5, 53, 54]	Predominantly low intensity, aiming for [BLa] at or below lactate threshold (LT2) [60] Alactic work < 30 s with > 2 min rest Elite athletes frequently using altitude generally complete threshold or VO _{2max} workouts at a ↓ speed/intensity (↓ volume and ↑ recovery as specified) [2, 47, 58, 74] When possible, it may be advantageous to do higher-intensity training at lower altitudes (LHTL)	Rest during intervals increase 50–100% [47]
Week 2	Normal-high May be increased beyond preceding volumes completed at sea level [5, 53, 58]	<i>Initial athlete altitude sojourn/conservative approach:</i> Predominantly low intensity, aiming for [BLa] at or below lactate threshold (LT2) [60] <i>Altitude experienced athletes:</i> emerging data suggest elite athletes can tolerate higher training intensities [53] Threshold or VO _{2max} workouts can reach full volume and normal frequency for athletes habituated to altitude Longest interval at race pace: 60–90 s for 800 m 2–3 min for 1500 m When possible, it may be advantageous to do higher-intensity training at lower altitudes (LHTL)	Rest during intervals can start to shorten from 150 to 200% of sea-level rest toward 125–150%
Week 3	Normal-high ↓ volume final 2–4 days depending on timing of competition post-altitude	Training intensity at normal levels [47] Longest interval for distance at or close to race pace: 2 min for 800 m 4 min for 1500 m When possible, it may be advantageous to do higher-intensity training at lower altitudes (LHTL)	Rest still 25–50% longer than normal
Week 4	↓ volume final 2–4 days depending on timing of competition post-altitude	Race-pace sessions prioritized leading into competition When possible, it may be advantageous to do higher-intensity training at lower altitudes (LHTL)	Rest still 25–50% longer than normal

Tabella 10 Esempio di programmazione di allenamento in un training camp di un atleta di corsa della durata di quattro settimane. ↓ indicates decrease, ↑ indicates increase

tempo massimo per cui l'atleta debba rientrare dall'altura, in quanto il “ri-acclimatamento” a quote più basse risulta essere un processo altamente specifico e differente tra i diversi soggetti⁷⁰.

6. CONCLUSIONI

L'obiettivo di questo lavoro di tesi era mettere in luce come l'allenamento in condizioni ipossiche sia di fondamentale importanza per implementare le performance di tutti gli sport, sia di resistenza che di squadra o di forza. In conclusione, è dunque possibile affermare che, se adeguatamente somministrato l'allenamento in condizioni ipossiche condurrà ad un miglioramento della fitness del soggetto evitando situazioni di malessere che peggiorano la performance.

È di sostanziale importanza che gli allenatori programmino a lungo termine le fasi di permanenza e allenamento in altura, tenendo conto del calendario degli atleti, monitorando costantemente i parametri fisiologici durante i periodi di permanenza ad alta quota e adattando i carichi di allenamento e l'intensità in base alla risposta all'acclimatazione.

Sia che si tratti di sport di resistenza, sia che si parli di sport di forza o di squadra, sono numerose le ricerche che ne elogiano i benefici, a discapito di poche che evidenziano possibili problematiche. Prevedere dunque periodi di allenamento in alta quota all'interno dei propri programmi di lavoro rispettando le linee guida e le corrette metodologie di allenamento, permette a tutti gli sportivi di ottenere la giusta sinergia per raggiungere la massima performance ottenibile.

7. BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

1. Berglund, “*High-Altitude Training*”, 1992, *Sports Medicine* 14, 289–303.
2. Dr. Luigi Vanoni, “*L’alta quota e gli effetti sull’organismo*”, Club alpino italiano, 2021, https://www.cai.it/organo_tecnico/commissione-centrale-medica/lalta-quota-e-gli-effetti-sullorganismo/
3. John B. West, Andrew M. Luks, “*Fisiologia della respirazione*”, USA, 2006, pp.190-192.
4. “*Fisiologia della respirazione*”, cit.
5. “*Fisiologia della respirazione*”, cit.
6. Samaja, Prampero, Cerretelli, “*The role of 2,3-DPG in the oxygen transport at altitude*”, 1986, *Respir Physiol* 64:191-202.
7. Isao Murakoka, Yuko Gando, “*Effect of the live high – train high and live high – train low protocols on physiological adaptations and athletic performance*”, 2012, *J Phys Fitness Sport Med*, 1(3): 447-455.
8. Randall Wilber, “*Application of altitude/hypoxic training by elite athletes*”, 2007, *Med. Sci. Sports exerc.*, Vol. 39, No. 9, pp. 1610-1624.
9. Op.cit.
10. Op. cit.
11. Olivier Girard, Frank Brocheire, Paul Goods, Gregoire Millet, “*An updated panorama of living low – training high altitude hypoxic methods*”, 2020, *Front. Sports Act. Living* 2:26.
12. Op. cit.

13. John B. West, Andrew M. Luks, “*Fisiologia della respirazione*”, USA, 2006, pp. 192-193.
14. Honingman, B., et al, “*Acute mountain sickness in a general tourist population at moderate altitude*”, 1993, Intern. Med., 118:587.
15. Malconian, M.K., and Rock, “*Medical problems related to altitude.*”, 1994, Human performance Physiology and environmental medicine at terrestrial extremes, p 33.
16. Op. cit.
17. Stephen R. Muza, Charles S. Fulco, Allen Cymerman, “*Altitude acclimatization guide*”, 2004, Thermal & Mountain Medicine Division, p 3
18. Op. cit.
19. Peter H. Hackett, “*The cerebral etiology of high-altitude cerebral edema and acute mountain sickness*”, 1999, Wilderness & Environmental Medicine, vol. 10, Issue 2, pp 97-109
20. Op. cit.¹⁷
21. Op. cit.¹⁷
22. Op. cit. ¹⁷
23. Op. cit.¹⁷
24. Op. cit. ¹⁷
25. Rusko HK, Tikkanen HO, Peltonen JE, “*Altitude and endurance training*”, 2004, J. Sport Sci, 10:928-44.
26. Op. cit.¹⁷
27. Op. cit. ¹⁷

28. Kraemer, et. Al., "*Progression models in resistance training for healthy adults*", 2002, Med. Sci. Sport Exerc., 34: 364-380.
29. McCall, et. Al., "*Acute and chronic hormonal responses to resistance training designed to promote muscle hypertrophy.*", 1999, Can J Appl Physiol, 24:96-107.
30. Sutton JR, "*Effect of acute hypoxia on the hormonal response to exercise.*", 1977, J Appl Physiol, 42:587-592.
31. Kon, et. Al., "*Effects of acute hypoxia on metabolic and hormonal responses to resistance exercise.*", 2010, Med Sci Sports Exerc, 42:1279-1285.
32. Kazumichi Kurobe, et. Al., "*effect of resistance training under hypoxic conditions on muscle hypertrophy and strength*", 2015, Clin Physiol Funct Imaging, 35: 197-202.
33. Op. cit.
34. Friedmann, Kinsherf, et. Al., "*Effects of low -resistance/high-repetition strength training in hypoxia on muscle structure and gene expression*", 2003, Eur J Physiol, 446:742-751.
35. Op. cit.
36. Op. cit.
37. Alcaraz, Sanchez, et. Al., "*Physical performance and cardiovascular responses to an acute bout of heavy resistance circuit training versus traditional strength training*", 2008, J Strenght Cond Res, 22: 667-671.

38. Domingo J. Ramos Campo, et. Al., “*Acute physiological and performance responses to high-intensity resistance circuit training in hypoxic and normoxic condition*”, 2017, *J Strength Cond Res*, 31(4): 1040-1047.
39. Op. cit.
40. Op. cit.
41. Op. cit.
42. Gerard Flaherty, et. Al., “*Altitude training for elite endurance athletes: a review for the travel medicine practitioner.*”, 2016, *Travel Medicine and Infectious Disease* 14, p 200-211.
43. Semenza GL, “*O₂-regulated gene expression: transcriptional control of cardiorespiratory physiology by HIF-1*”, 2004, *J Appl Physiol*, 96(3):1173-7.
44. Mazzeo RS., “*Physiological responses to exercise at altitude – an update.*”, 2008, *Sport med*, 38(1):1590-9.
45. Schoene RB, “*Limits of human lung function at high altitude.*”, 2001, *J Exp Biol*, 204(18): 3121-7.
46. Robbins PA, “*Role of the peripheral chemoreflex in the early stages of ventilatory acclimatization to altitude*”, 2007, *Physiol Neurobiol*, 158(2-3):237-42.
47. Op. Cit.
48. Mairbaurl H, “*Red blood cell function in hypoxia at altitude exercise*”, 1994, *Int J Sports Med*, 15(2):51-63.

49. Hansen J, Sander M, “*Sympathetic neural overactivity in healthy humans after prolonged exposure to hypobaric hypoxia*”, 2003, J Physiol, 546(3):921-9.
50. Op. cit.
51. Op. cit.
52. Op cit.
53. Friedmann-Bette B. “*Classical altitude training*”, 2008, Scand J Med Sci Sports, 18(1 suppl):11-20.
54. Mazzeo RS, Fulco CS, “*Physiological system and their responses to condition of hypoxia.*”, 2006, ACSM’s advanced exercise physiology, 143:564-80.
55. Drust B, “*Exercise at altitude*”, 2010, Scott Med J, 55(2):31-4.
56. Beall CM, et. Al., “*An Ethiopian pattern of human adaptation to high altitude hypoxia*”, 2002, Proc Natl Acad Sci, 99(26):17215-8.
57. Op. Cit.
58. Zoll J, et. Al., “*Exercise training in normobaric hypoxia in endurance runners III*”, 2006, J Appl Physiol, 100(4):1258-66.
59. Mounier R, et. Al., “*Muscle specific expression of hypoxia-inducible factor in human skeletal muscle*”, 2010, Exp Physiol, 95(8):899-907.
60. Gore CJ, et. Al, “*Nonhematological mechanisms of improved sea-level performance after hypoxic exposure*”, 2007, Med Sci Sport Exerc, 10(2):1600-9.
61. Millet GP, et. Al., “*Combining hypoxic methods for peak performance*”, 2010, Sport med, 40(1):1-25.

62. Op. Cit.
63. Solli Gs, et. Al., “*The training characteristics of the world’s most successful female cross-country skier*”, 2017, *Front Physiol*, 8:1069.
64. Inigo Mujika, et. Al., “*Contemporary periodization of altitude training for elite endurance athletes: a narrative review*”, 2019, *Sport medicine*, 49:1651-1669.
65. Op. cit.
66. Sanders PU, et. Al., “*Endurance training at altitude*”, 2009, *High Alt Med Biol*, 10(2):135-48.
67. Op. cit.
68. Op. cit.
69. Wachsmuth NB, et. Al., “*The effects of classic altitude training on hemoglobin mass in swimmers*”, 2013, *Eur J Appl Physiol*, 113(5):1199-211
70. Chapman RF, et. Al., “*Timing of return from altitude training for optimal sea-level performance*”, 2014, *J Appl Physiol*, 116(7):837-43.