



Ejercicio y Entrenamiento en Altitud

Dr. Patricio Venegas Pérez

Médico Jefe dpto. Médico Centro de Alto Rendimiento, DIGEDER
Cardiólogo Clínica Las Condes

Ejercicio y Entrenamiento en Altitud

Dr. Patricio Venegas Pérez

Médico Jefe dpto. Médico Centro de Alto Rendimiento, DIGEDER
Cardiólogo Clínica Las Condes

Desde hace siglos que los efectos de la altitud en el ser humano han generado el interés de los científicos. Previo a la realización de las Olimpiadas de Méjico en 1968, se generó un gran debate con relación a los riesgos de la competencia en altitud, del rendimiento a este nivel y del tiempo necesario para la adaptación. Diversos estudios se realizaron para tratar de responder estas preguntas, demostrándose claramente que se requieren períodos de aclimatización previos a la participación en eventos deportivos en altitud. Probablemente, debido a los esfuerzos de aclimatización de algunos deportistas, fue que en estas Olimpiadas el rendimiento deportivo disminuyó en menor magnitud a lo esperado. Posteriormente, se planteó la hipótesis que la estadía en altitud con sus cambios fisiológicos, similares a algunos asociados con el entrenamiento deportivo, podría potenciar los efectos de este último, y así, también mejorar el rendimiento deportivo a nivel del mar. Esta hipótesis ha generado gran discusión en las últimas 2 décadas, apareciendo posturas encontradas. Diversas otras incógnitas se plantean con relación al entrenamiento en altitud. En este capítulo, trataremos de responder a las preguntas más relevantes. Como una necesaria introducción, revisaremos primero los cambios fisiológicos que ocurren en altitud. Luego, analizaremos las implicancias que tienen estos cambios para la realización de ejercicio en altitud. Por último, veremos los efectos del entrenamiento en altitud y su asociación con los cambios propios de la aclimatización.

Cambios y Adaptaciones Fisiológicas en el Ser Humano en Altitud

La exposición a la altitud representa para el ser humano un estrés fisiológico que puede implicar riesgo vital en situaciones extremas. En el organismo se generan una serie de respuestas agudas, inmediatas y otras en el mediano y largo plazo, para enfrentar un medio tan adverso.

En este capítulo, describiremos los efectos de una exposición aguda a la hipoxia hipobárica, separándolos de aquellos cambios fisiológicos que ocurren en el corto y mediano plazo (1 a 4 semanas), fenómeno conocido como aclimatación. Para mayor profundización se recomiendan revisiones previas (1,2).

Respuestas Agudas a la Altitud

Cuando un nativo de nivel del mar asciende a una altitud moderada (ver Tabla 1) se producen algunas respuestas inmediatas, siendo la más importante la hiperventilación. Esta se genera debido a la disminución de la fracción inspirada de oxígeno (FIO_2), secundaria a la disminución de la presión barométrica (PB), característica de la altitud. Como consecuencia, esto lleva a una caída en la presión parcial de oxígeno a nivel alveolar (PAO_2) y de la presión parcial de oxígeno a nivel arterial (PaO_2). Esta caída de la PaO_2 es sensada a nivel de los quimiorreceptores carotídeos y del arco aórtico, estimulando al centro respiratorio, lo que se traduce en hiperventilación (3,4). El aumento de la ventilación tiende a restaurar al menos parcialmente la PAO_2 y la PaO_2 (5). La respuesta ventilatoria a la hipoxia, además, produce una disminución de presión parcial de CO_2 arterial ($PaCO_2$), y por lo tanto, una alcalosis respiratoria secundaria. Esta última tiende a oponerse y limitar la hiperventilación.

Algunos estudios han demostrado que aquellos individuos con mayor respuesta ventilatoria a la hipoxia, tienen una menor caída de la PAO_2 en altitud y también, tendrían un mejor rendimiento en altitud (6).

Una vez que el oxígeno ha llegado a los alvéolos debe difundir a la sangre arterial para ser transportada a todo el organismo. Algunos factores podrían limitar un adecuado intercambio gaseoso a nivel alvéolo-capilar en la altitud:

- En hipoxia el equilibrio entre las presiones parciales de O_2 alvéolo-capilar se alcanzaría más tardíamente debido a la menor gradiente de presión existente, pero esto implica una limitación en reposo, sólo en altitudes extremas (7).
- Es probable que algún grado de edema pulmonar subclínico ocurra en la altitud, y esto, también limite la difusión pulmonar (8).
- En hipoxia, puede existir una distribución no uniforme de la ventilación y perfusión pulmonar (VA/Q), especialmente debido a la heterogeneidad de la circulación pulmonar dado por zonas de vasoconstricción pulmonar que son parcialmente compensadas por la mayor ventilación (9).

En hipoxia aguda, se producen también, algunos cambios cardiovasculares en reposo y en ejercicio. En reposo aumenta la frecuencia cardiaca y el gasto cardiaco (volumen minuto cardíaco), sin que se produzcan cambios en el volumen expulsivo (o volumen latido) (3,10).

En los primeros días en altitud se produce una disminución del volumen plasmático debido fundamentalmente a una redistribución de agua hacia el intracelular, lo que lleva a hemoconcentración, aumentando el hematocrito, lo que incrementa la capacidad de transporte de O_2 en la sangre y el contenido arterial de O_2 (CaO_2).

Aclimatación a la Altitud

A medida que la estadía en altitud se prolonga, se produce una gran variedad de cambios fisiológicos que permiten adaptarse a esta. El período de tiempo que se requiere para alcanzar esta aclimatización depende de la magnitud de la altitud, del nivel de altitud de la residencia habitual y de experiencia previa en altitud.

La ventilación pulmonar en reposo aumenta con la estadía en altitud, de manera que un individuo aclimatizado tiene mayor ventilación que un recién llegado. En los primeros días de aclimatización se produce un progresivo aumento en la PAO_2 y una caída en la $PACO_2$ y $PaCO_2$ (11, 12). Esta disminución de la $PaCO_2$ en altitud produce una elevación del pH sanguíneo, de manera que la sangre se hace más alcalina, fenómeno conocido como alcalosis respiratoria. Para contrarrestarla, se produce una mayor excreción renal de bicarbonato a través de los túbulos renales resultando una orina más alcalina. Esto se conoce como compensación metabólica. Esta restauración del equilibrio ácido-base genera al menos 3 efectos fisiológicos:

- Al restaurarse al menos parcialmente el pH sanguíneo, se aumenta la capacidad de respuesta del centro respiratorio a la disminución de la PaO_2 , generándose mayor hiperventilación como respuesta a la hipoxia.
- La normalización del pH, también, permite que se exprese el efecto del 2,3 DPG sobre la curva de disociación de la hemoglobina, disminuyendo el efecto contrario de la alcalosis respiratoria.
- Por último, se genera una pérdida de la reserva alcalina absoluta, y por lo tanto, una disminución de la capacidad sanguínea de tamponar ácidos, como el ácido láctico, por ejemplo.

El aumento del CaO_2 es uno de los efectos más importantes de la aclimatización y se produce tanto por aumento de la PaO_2 por la hiperventilación, como por aumento de la hemoglobina (HG) y el hematocrito. En los primeros días en la altitud el aumento del hematocrito se debe a la hemoconcentración que se observa con la disminución del volumen plasmático, sin aumento de la masa de glóbulos rojos. Posteriormente, empieza a aumentar la masa de glóbulos rojos por efecto de la eritropoyetina una hormona secretada por el riñón y cuyo rol es estimular la eritropoyesis (generación de glóbulos rojos) en médula ósea. La eritropoyetina aumenta precozmente en la llegada a altitud, alcanzando su máximo entre las 24 y 48 hrs, pero se requiere de 1 o más semanas antes de que se vea un aumento de los glóbulos rojos circulantes (13, 14).

Un mecanismo que puede facilitar el transporte y la entrega de O_2 a los tejidos es la disminución de la afinidad de la Hb por el O_2 , secundaria a un aumento del 2,3 DPG en el glóbulo rojo durante la aclimatización a altitud.

Como comentamos previamente, este efecto se ve atenuado por la alcalosis respiratoria presente en la altitud (15).

En la altitud se producen cambios en el volumen plasmático que podrían explicarse a través de diversos mecanismos. La disminución del volumen plasmático en la aclimatización a la altitud se produce principalmente por una redistribución de agua hacia el extravascular (específicamente al espacio intersticial) en los primeros días en altitud, estabilizándose posteriormente (16).

Durante la primera semana en altitud se produce una disminución de la secreción de aldosterona (hormona esteroidea, mineralocorticoide sintetizado en la médula suprarrenal) cuyo rol es la reabsorción de sodio y agua en los túbulos renales. Esta disminución de la aldosterona puede contribuir a la disminución del volumen plasmático (17, 18). Es probable que el retorno a la normalidad de los niveles de aldosterona pueda ser un buen marcador de aclimatización. Por otro lado, no se observan cambios concluyentes de la vasopresina y del péptido auricular natriurético en altitud.

Durante la estadía en altitud se producen una serie de cambios metabólicos y de utilización del sustrato energético. Al llegar a altitud se produce un aumento del metabolismo basal, fenómeno que tiende a normalizarse con la estadía prolongada. Con la aclimatización se produce un progresivo aumento en la contribución relativa de la oxidación de las grasas para satisfacer los requerimientos energéticos en reposo. El impacto de la aclimatización en la utilización de los sustratos energéticos es mucho más marcado en el ejercicio, como veremos más adelante. Aunque se ha planteado que los cambios dietéticos pudieran jugar un rol en esto, es el aumento en la actividad simpática lo más importante. Se produce un aumento de los niveles de norepinefrina desde las primeras horas de la estadía en altitud, estabilizándose en los días siguientes, en cambio no se observan cambios en los niveles de epinefrina (19). El aumento de la norepinefrina en plasma estimula la lipólisis a nivel del tejido adiposo, liberando ácidos grasos libres (AGL) y glicerol en el torrente sanguíneo. Esta mayor disponibilidad de AGL y su utilización como sustrato energético en los músculos permitiría ahorrar glicógeno muscular.

Probablemente, estos cambios en la actividad simpática juegan también un rol en las adaptaciones cardiovasculares de la aclimatación. Por otro lado, no se han observado cambios de la actividad parasimpática en la altitud.

También se ha observado un aumento del cortisol plasmático (glucocorticoide producido por la corteza suprarrenal) con la llegada a moderadas altitudes, lo que estaría representando el estrés medioambiental a que es sometido el organismo en esta condición. El cortisol se normaliza con la aclimatación a altitud.

Para que el oxígeno difunda en los tejidos desde los capilares hasta la mitocondria debe recorrer una distancia 10 veces mayor que en pulmón. La magnitud de esta barrera depende de:

- la vascularización o densidad capilar (mayor número de capilares por área de tejido).
- el tamaño de la fibra muscular.

Inicialmente se había planteado que con la aclimatación a la altitud aumentaba la densidad capilar, pero actualmente existe evidencia que esto no se produce por la formación de nuevos capilares, sino por una reducción en el tamaño de la fibra muscular (20,21).

Para superar esta barrera, el movimiento del oxígeno a este nivel no sólo se realiza por difusión pasiva, sino también por difusión facilitada gracias a la presencia de la mioglobina. La mioglobina es una proteína con grupos Hem similar a la hemoglobina, aunque su curva de disociación es una hipérbola, a diferencia de la forma en “S” itálica de la curva de disociación de la hemoglobina. También los diferencia sus P50 (presión parcial de oxígeno al cual se encuentran saturadas en un 50%), que son de 27 mm Hg para la hemoglobina y de 5 mm Hg para la mioglobina. Esto permite a la mioglobina captar el oxígeno a menores presiones parciales, y entregarlo a los tejidos donde la presión parcial de oxígeno es tan baja como 1 mm Hg a nivel mitocondrial. Un estudio clásico demostró que los nativos de altitud tenían mayores concentraciones de mioglobina en el músculo esquelético que los nativos de nivel del mar (22). Otros estudios, en animales han demostrado un aumento de la mioglobina con la aclimatación a la altitud.

El número o volúmen mitocondrial aumentaría en algunos animales en altitud, en cambio, en escaladores que retornan de los Himalayas, se observó una disminución del volumen mitocondrial asociado a una disminución de la masa muscular (23). Como veremos más adelante, este cambio va en sentido contrario a lo que ocurre con el entrenamiento de resistencia.

En diversos estudios en animales aclimatizados a altitud, se ha demostrado aumento de algunas enzimas del ciclo de Krebs o de la cadena transportadora de electrones, sin cambio en las enzimas glicolíticas, al compararlos con animales de la misma especie residentes a nivel del mar (24). En humanos los resultados han sido contradictorios, así, en escaladores que ascienden a grandes altitudes se ha observado disminución de las enzimas oxidativas (25). A moderadas altitudes, en cambio, la disminución de la actividad de las enzimas oxidativas se observa sólo en los individuos que no entrenan en altitud, o en los grupos musculares no entrenados (26). En la tabla 2 se comparan los cambios periféricos observados en el entrenamiento aeróbico y los producidos por la aclimatización a la altitud.

Ejercicio en Altitud

La disminución del rendimiento deportivo en altitud está determinado por la magnitud de esta, por la duración de la prueba deportiva y por el estado de aclimatización del deportista. Así, en pruebas de alrededor de 2 horas de duración, la disminución del rendimiento en altitud es aproximadamente de un 2% a los 1000 metros, un 3% a los 1500 metros, alrededor de un 5% en los 2000 metros y de un 8% en los 2500 metros. A pesar de los esfuerzos de aclimatización a 2500 metros, en pruebas atléticas el rendimiento disminuye en un 2% en los 1500 metros planos, hasta un 6-8% entre los 10.000 metros planos y la maratón.

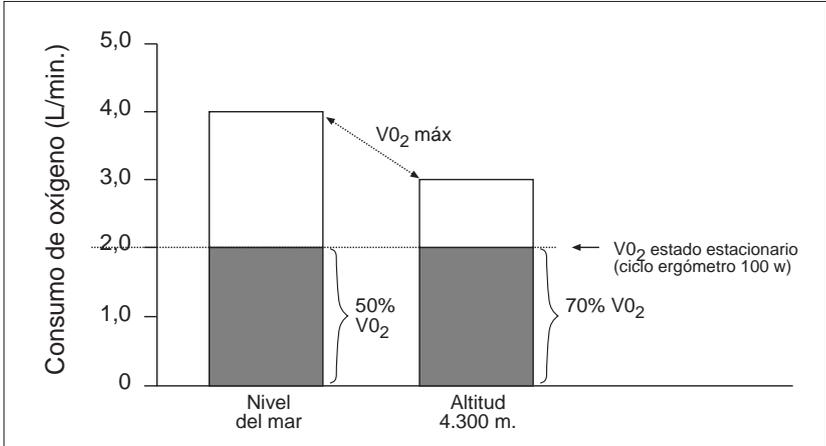
La disminución del rendimiento deportivo tiene relación con la disminución de la presión parcial de oxígeno que se encuentra en la altitud. Esto lleva a una disminución de la gradiente de presión en todos los niveles de la cascada de oxígeno, de manera, que la presión parcial de oxígeno en la mitocondria se hace crítica, generando una disminución del

consumo máximo de oxígeno (VO_2 máx). Esta disminución del VO_2 máx es más clara a partir de los 1500 metros de altitud, y es del orden del 1% por cada 100 metros por sobre esta altitud. Existe gran variabilidad individual en esta disminución, y en atletas se encuentra aún en altitudes menores (600 metros) (27). Se observa una relación directa, aunque débil, entre el VO_2 máx a nivel del mar y su disminución con el ascenso en altitud.

La disminución del VO_2 máx también impacta en la resistencia aeróbica (tiempo que se puede sostener un ejercicio submáximo), que es inversamente proporcional a la intensidad relativa de ejercicio (% del VO_2 máx). Un ejercicio de una intensidad dada, que corresponde a un determinado porcentaje del VO_2 máx a nivel del mar, va a ser de intensidad relativamente mayor a medida que subimos en altitud. Por ejemplo, un ejercicio que corresponde al 50% del VO_2 máx a nivel del mar, cuando lo realizamos a una altitud de 4300 metros, corresponderá a la utilización del 70% del VO_2 máx en esa altitud (ver Figura N° 1). A pesar que el VO_2 en estado estacionario requerido para esta intensidad absoluta de ejercicio no se ha modificado en altitud, con relación al del nivel del mar, la intensidad relativa es mayor y la tolerancia al ejercicio o resistencia aeróbica va a disminuir significativamente.

Figura N° 1.

Efecto de la altitud en la relación entre la producción de potencia absoluta, el consumo de oxígeno (VO_2) y la intensidad relativa de ejercicio (% VO_2 máx).



En achurado: VO_2 de estado estacionario para un ejercicio a 100W en cicloergómetro (Adaptado de referencia 2).

El VO_2 está determinado por el producto entre el gasto cardíaco (GC) y la diferencia arteriovenosa de oxígeno ($DAVO_2$). A su vez, el GC es el producto entre la frecuencia cardíaca (fc) y el volumen expulsivo (VEXP). La $DAVO_2$ es la diferencia entre el contenido arterial de O_2 (CaO_2) y el contenido venoso de O_2 (CvO_2).

$$VO_2 = (fc \times VEXP) \times (CaO_2 - CvO_2)$$

En exposición aguda a la hipoxia, la disminución del VO_2 máx con altitud se relaciona directamente con el CaO_2 . El CaO_2 está determinado por la concentración de hemoglobina (Hb) y la saturación arterial de Hb con oxígeno (SaO_2). Como la concentración de Hb no se altera durante una hipoxia aguda, el CaO_2 está directamente relacionado con la SaO_2 , que a su vez es función de las características de la curva de disociación de la Hb y de la PaO_2 , como ya se comentó previamente.

Al examinar la curva de disociación de la Hb, se observa que cuando la PaO_2 es superior a 75 mm Hg, la SaO_2 es cercana al 90%, de manera que se puede esperar que en esta situación, el VO_2 máx se modifique poco. En cambio, cuando la PaO_2 cae bajo los 70 mm Hg, momento en que la curva de disociación de Hb tiene su mayor pendiente, se produce una gran disminución de la SaO_2 , con la consiguiente caída en el CaO_2 y en el VO_2 máx.

Para sostener una adecuada PAO_2 en altitud, se requiere generar un aumento de la ventilación, que es mayor en niveles submáximos en comparación con el nivel del mar. Así, el aumento de la ventilación lleva asociado un aumento del equivalente ventilatorio (VE/VO_2) lo que en cierta medida es ineficiente desde el punto de vista metabólico, pero permite mantener niveles adecuados de VO_2 . El VO_2 requerido a una intensidad de ejercicio determinada es similar en altitud como a nivel del mar. Pero en hipoxia aguda, los valores submáximos de ventilación, fc, GC y acumulación de lactato son mayores. En cambio, si comparamos estas mismas variables al mismo % del VO_{2max} (VO_2 relativo) en una altitud determinada, los valores serán similares que a nivel mar.

Entrenamiento en Altitud

Entrenamiento en Altitud para Competir en la Altitud

La estadía en altitud por períodos cortos (semanas) produce mejoría en el rendimiento físico en esta. Algunos estudios han mostrado un aumento en la resistencia en ejercicios submáximos, luego de una estadía de 2 a 3 semanas en altitud. Maher y cols. (28) estudiaron los cambios en la resistencia a un ejercicio submáximo con una estadía continua a una altitud de 4300 metros. Ocho individuos, previamente entrenados, fueron sometidos a un ejercicio submáximo hasta el agotamiento, en un cicloergómetro al 75% del VO_2 máx relativo, a nivel del mar y a los 2 y 12 días de estadía en altitud. El tiempo que resisten este ejercicio submáximo mejoró significativamente entre el día 2 y el día 12 en un 45%. Esto se asoció a una disminución de los niveles de lactato durante el ejercicio el día 12. En otro estudio, Hortsman y cols. (29) estudiaron a 9 individuos sedentarios, que fueron sometidos a una estadía continua en altitud de 4300 metros durante 3 semanas. Se realizó un ejercicio submáximo al 85% del VO_2 máx en una cinta rodante, produciéndose una mejoría del tiempo de resistencia en un 60% con la estadía en altitud.

Esta mejoría de la resistencia aeróbica podría explicarse al menos a través de 2 mecanismos: un aumento del VO_2 máx y/o un ahorro del glicógeno muscular.

Durante la aclimatación a altitud se produce un aumento del VO_2 máx en la estadía crónica con relación al momento de hipoxia aguda. Así, a 4300 metros el VO_2 máx disminuyó un 30% al momento de llegar luego, esta disminución se atenuó en un 10% en la estadía crónica (15 días). Este aumento del VO_2 máx durante la aclimatación, se explicaría por una mayor capacidad de transporte de oxígeno (aumento de hemoglobina y hematocrito), y probablemente, también por algunos efectos a nivel periférico (aumento de la vascularización, de la actividad de enzimas oxidativas, de las mitocondrias, etc.).

Hace varias décadas, Edwards (30) demostró que individuos aclimatizados tenían una menor producción de lactato con ejercicio en altitud, fenómeno

conocido posteriormente como “paradoja del lactato”. Para algunos, esta menor producción de lactato se explicaría por una mayor capacidad oxidativa a nivel mitocondrial, de manera que disminuye la velocidad de la glicólisis y la demanda anaeróbica. Estudios posteriores han asociado esta paradoja del lactato con ahorro en la utilización del glicógeno muscular durante el ejercicio. Es importante recordar, que el principal determinante de la utilización del glicógeno muscular durante el ejercicio es la intensidad relativa (%VO₂ máx) y no la absoluta. Young y cols. (31) demostraron un ahorro del glicógeno muscular utilizado por el ejercicio en altitud después de una aclimatización de 18 días. Esta menor utilización del glicógeno se asoció a una menor producción de lactato, y a una mayor movilización y utilización de ácidos grasos libres (AGL) durante el ejercicio. Así, en individuos aclimatizados, la fuente de energía utilizado cambió en dirección de la oxidación de las grasas, generándose un ahorro de los depósitos de glicógeno muscular. Este efecto puede en parte explicarse por el aumento de la actividad simpática en altitud, un estímulo muy fuerte para producir lipólisis a nivel del tejido adiposo.

Entrenamiento en Altitud para competir a nivel del mar

Como vimos previamente, la aclimatización a altitud mejora el rendimiento físico en ella, hecho no discutido en la actualidad. En cambio, el efecto de la aclimatización a altitud sobre el rendimiento a nivel del mar una vez retornado de esta, ha generado gran controversia en las últimas décadas.

El impacto de la aclimatización sobre el rendimiento deportivo a nivel del mar, se fundamenta en la mejoría en la capacidad de transporte de oxígeno (por aumento de la hemoglobina y del hematocrito) y en la extracción y utilización periférica del oxígeno por los tejidos (aumento de la mioglobina, mitocondrias y enzimas oxidativas) que se observan con la estadía crónica en altitud. Por otro lado, también se ha postulado que el ejercicio realizado en condiciones hipóxicas puede aumentar el estímulo del entrenamiento y de esta manera, potenciar los efectos del entrenamiento de resistencia (o aeróbico). Así, la aclimatización en altitud

y el entrenamiento “hipóxico” pueden tener efectos sinérgicos que podrían superar los efectos del entrenamiento a nivel del mar. Desafortunadamente, la hipoxia hipobárica de la altitud limita las posibilidades de realizar entrenamientos de gran intensidad, de manera que en altitud pueden generarse situaciones de subentrenamiento o desentrenamiento, al no ser posible mantener las cargas de entrenamiento que se realizan a nivel del mar.

Diversos estudios se realizaron desde la década de los sesenta para evaluar si la aclimatación a la altitud mejoraba el rendimiento a nivel del mar. Luego de estadías entre 2 a 4 semanas en la altitud, al retornar al nivel del mar, habitualmente no se observaron mejorías en el VO_2 máx y los resultados con relación al rendimiento deportivo fueron muy controvertidos. La mayoría de estos estudios presentaba errores metodológicos que los hacían difíciles de interpretar: ausencia de grupos controles, número insuficiente de individuos, incapacidad de mantener niveles adecuados de entrenamiento, etc.

Un estudio (32) evaluó si el asociar entrenamiento a la estadía en altitud tenía un mayor impacto sobre los efectos de la aclimatación a la altitud. Se estudiaron 12 individuos que fueron sometidos a una estadía a 2300 metros durante 13 días, la mitad realizaron un programa de entrenamiento en cicloergómetro al 75% de la frecuencia cardíaca máxima durante 45 minutos todos los días, y la otra mitad no realizó este programa de entrenamiento. El grupo de individuos entrenados en altitud presentó una mayor respuesta eritropoyética (mayor aumento de reticulocitos), un mayor aumento del 2,3 DPG en el glóbulo rojo y una disminución de la afinidad de la hemoglobina por el oxígeno (aumento del P50). Todas estas adaptaciones llevan a una mejoría en el transporte de oxígeno por el glóbulo rojo y una mayor entrega de éste a los tejidos. En ese mismo trabajo se observó que esto se asociaba a una mejoría en el rendimiento durante el ejercicio.

Un estudio clásico realizado en 1975 (33) marcó la opinión científica por cerca de 2 décadas. Para evaluar si el entrenamiento en altitud es más efectivo que el entrenamiento a nivel del mar, estudiaron a 12 corredores de

mediofondo bien entrenados, quienes fueron separados en 2 grupos de 6 deportistas cada uno. Un grupo continuó entrenando a nivel del mar por 3 semanas corriendo 19,3 Km al 75% del VO_2 máx. El otro grupo, en una altitud de 2300 metros, realizó un esquema similar de entrenamiento, pero al 75% de su VO_2 máx relativo (es decir, del VO_2 máx a 2300 metros). A las 3 semanas ambos grupos se intercambiaban, el que entrenó en altitud pasó a nivel del mar y viceversa. Luego de la estadía en altitud, al retornar al nivel del mar, el VO_2 máx disminuyó cerca de un 3% y no se presentó una mejoría significativa en el rendimiento en una carrera de 2 millas. Este estudio dominó la literatura científica por muchos años. Es probable que el entrenamiento a una intensidad de VO_2 máx relativa a la altitud y no absoluta, podría implicar un subentrenamiento con relación a las intensidades de entrenamiento a nivel del mar. Este hecho puede explicar la ausencia de beneficio con el entrenamiento en altitud en ese estudio. También es probable que la mayor oxigenación del retorno a nivel del mar pudiera causar un deterioro del VO_2 máx por medio de estrés oxidativos.

Diversos estudios han mostrado que la intensidad absoluta de entrenamiento no puede ser mantenida en altitud. En un estudio reciente (34) se observó que al entrenar a 2700 metros la intensidad del entrenamiento aeróbico de base disminuyó a un 63% del VO_2 máx absoluto, en cambio, a nivel del mar la intensidad fue del 72%. Una altitud intermedia de 1250 metros indujo una menor disminución de la intensidad del entrenamiento (67%). Ocurrió algo similar con el entrenamiento de intervalos (repeticiones de 1000 metros), que se realizaron al 92% del VO_2 máx a nivel del mar, a 86% del VO_2 máx a 1250 metros y al 73% del VO_2 máx a 2700 metros de altitud. De manera que el entrenamiento en altitud puede generar un desentrenamiento relativo que puede ir en sentido contrario a los efectos de la aclimatación, y así, no obtener resultados positivos para mejorar el rendimiento a nivel del mar.

Para superar éste inconveniente, desde comienzos de los '90 se ha desarrollado un modelo de entrenamiento en altitud que consiste en pasar el máximo de tiempo en la altitud para, así, obtener los beneficios de la

aclimatación a la altitud, y entrenar a baja altitud, para mantener las altas intensidades de entrenamiento. Este modelo, conocido como “high-low”, de vivir alto y entrenar bajo ha mostrado resultados muy positivos en mejorar el rendimiento deportivo a nivel del mar. Un estudio muy reciente (34) utilizando un protocolo muy adecuado, estudió a 39 atletas de nivel universitario que fueron ingresados a un programa de entrenamiento de 8 semanas. Las primeras 4 semanas a nivel del mar y las siguientes 4, en una de estos 3 esquemas: **a)** high-low, que vivían a moderada altitud (2700 metros) y entrenaban a baja altura (1250 metros); **b)** high-high, que vivían y entrenaban a moderada altitud (2700 metros); y **c)** low-low, que vivían y entrenaban a nivel del mar (150 metros). Todos los grupos de 13 deportistas cada uno. Ambos grupos que vivían a 2500 metros mostraron una mejoría del VO_2 máx en aproximadamente un 5% al retornar al nivel del mar, lo que no ocurría con los individuos que vivían a nivel del mar. El VO_2 en máximo estado estacionario (que se puede asimilar al VO_2 a umbral anaeróbico o ventilatorio) y el rendimiento en una carrera de 5000 metros, mejoraron significativamente sólo en el grupo high-low, es decir, que durmieron a moderada altitud y entrenaron a baja altitud. La mejoría en el tiempo de carrera en 5000 metros persistió al menos por 3 semanas luego del retorno al nivel del mar. La magnitud de la mejoría en el rendimiento en 5000 metros se correlacionó significativamente con la mejoría del VO_2 máx del entrenamiento en altitud.

En un estudio posterior del mismo grupo (35), estudiaron a 26 corredores de fondo de primer nivel, para evaluar si el entrenamiento en altitud era útil en deportistas con alto nivel de entrenamiento y rendimiento. Los sometieron a un esquema tipo high-low durante 3 semanas, demostrando un aumento del VO_2 máx y una mejoría en el rendimiento en una prueba de 3000 metros, luego del retorno al nivel del mar. Es decir, el entrenamiento en altitud también beneficia a aquellos deportistas que tienen altos niveles de entrenamiento.

Estos mismos autores reevaluaron los datos de 39 deportistas sometidos a un entrenamiento en altitud en distintos períodos (36), tratando de explicarse la gran variabilidad individual en los resultados de estos atletas. Los separaron en respondedores o no respondedores según mejoraban o no su rendimiento

deportivo luego de un programa de entrenamiento en altitud. Se demostró que los individuos respondedores tenían mayores niveles de eritropoyetina y mayor aumento de la masa de glóbulos rojos, que los individuos no respondedores. Por otro lado, los individuos respondedores fueron capaces de sostener mayores intensidades de entrenamiento de intervalos, siendo capaces de realizar las repeticiones de 1000 metros a una mayor intensidad con relación a su tiempo en 5000 metros y a un mayor VO_2 relativo (% de VO_2 máx a nivel del mar). También se ha demostrado que los individuos no respondedores tienen menores depósitos de hierro (37).

De manera, que se puede identificar a un subgrupo de deportistas que van a responder positivamente, mejorando su rendimiento deportivo con un entrenamiento en altitud caracterizado por vivir alto y entrenar bajo. Aquellos individuos que presentan una buena respuesta hematológica (aumento de la masa de glóbulos rojos) durante su aclimatización a la altitud, se beneficiarán de una estadía en altitud. Aquellos atletas que son capaces de sostener altas intensidades de entrenamiento en altitud, se beneficiarán de un programa de entrenamiento en altitud.

Así, se puede predecir el resultado individual de un programa de entrenamiento en altitud, de manera que aquellos deportistas que no tengan una adecuada respuesta eritropoyética en altitud, no se beneficiaran con una estadía en altitud. En cambio, aquellos con una buena respuesta hematopoyética se beneficiaran con una estadía en altitud, asociando un entrenamiento en moderada altura para aquellos que son capaces de sostener altas intensidades de entrenamiento en la altitud, y un entrenamiento a baja altitud para aquellos que no son capaces de sostener altas intensidades de entrenamiento en altitud.

- Para finalizar, destacaremos algunos aspectos relevantes a considerar en un programa de entrenamiento en altitud: Para competir en altitud, se requiere de un período de aclimatización adecuado, que durará entre 3 y 4 semanas. Dependiendo de la altitud de la competencia. Se requiere de una semana más de aclimatización por cada 500 metros por sobre los 3000 metros.

- Para competir a nivel del mar, se requiere de un período de a lo menos 3 semanas para obtener los beneficios de la aclimatación, y la mejoría en el rendimiento a nivel del mar se observará hasta 3 semanas después del retorno al nivel del mar.
- Antes de ingresar a un deportista a un programa de entrenamiento en altitud deben tomarse en cuenta algunos aspectos: **a)** salud del deportista, **b)** su estado nutricional, donde los depósitos de fierro deben ser óptimos, **c)** la experiencia previa en altitud, **d)** la altitud efectiva, que es la diferencia entre la altitud de residencia habitual y aquella en que se va a competir, **e)** nivel de entrenamiento previo.
- Para obtener una aclimatación óptima, se debe vivir a una altitud entre 2500 y 3000 metros.
- La altitud a la que se debe entrenar va a depender de la experiencia previa en altitud y la capacidad de mantener adecuadas intensidades de entrenamiento en altitud. El entrenamiento de intervalo no debe realizarse en altitudes superiores a los 1500 metros, debido a la incapacidad de sostener intensidades adecuadas. El entrenamiento de base, en cambio, puede realizarse a diversas altitudes dependiendo de los objetivos específicos dentro de la planificación del entrenamiento. Si se realiza a baja altitud puede facilitar la recuperación y ser utilizado como un entrenamiento regenerativo, y disminuir el impacto de la altitud sobre el deportista (disminución del volumen plasmático, por ejemplo). Si se realiza a moderadas altitudes puede multiplicar el impacto de la aclimatación, por efecto del ejercicio hipóxico. En aquellos deportistas que son capaces de sostener altas intensidades de entrenamiento en altitud, el ideal es realizar el entrenamiento a la misma intensidad absoluta que a nivel del mar. En el resto, debiera realizarse a la misma intensidad relativa (% VO_2 máx en altitud).

TABLAS

TABLA 1

Graduación de la magnitud de las altitudes.

| | |
|------------------|--------------------|
| Nivel del mar | 0 a 500 metros |
| Baja altitud | 500 a 1500 metros |
| Moderada altitud | 1500 a 3000 metros |
| Gran altitud | 3000 a 5500 metros |
| Altitud extrema | > 5500 metros |

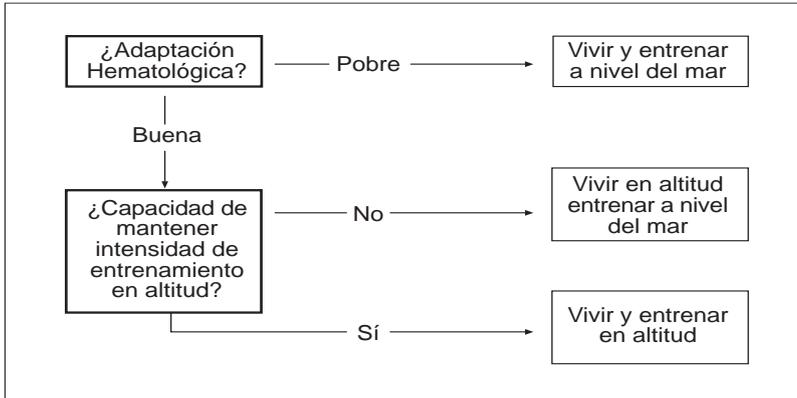
TABLA 2

Comparación de los efectos periféricos de la aclimatización en altitud y el entrenamiento aeróbico (Adaptado de referencia 38).

| | ENTRENAMIENTO AEROBICO | ACLIMATIZACION EN ALTITUD |
|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Densidad capilar | AUMENTA asociado a generación de nuevos capilares | AUMENTA secundario a disminución del diámetro de las fibras musculares |
| Diámetro de la fibra muscular | Puede AUMENTAR | DISMINUYE |
| Mioglobina | NO CAMBIA en humanos | AUMENTA en músculo esquelético y cardíaco |
| Enzimas musculares | AUMENTAN las enzimas oxidativas NO CAMBIAN las Enzimas glicolíticas | A moderadas altitudes es igual al entrenamiento aeróbico A extremas altitudes: AUMENTAN las enz. glicolíticas DISMINUYEN las enz. oxidativas |
| Número o volumen mitocondrial | AUMENTA | DISMINUYE asociado a menor masa muscular |

Figura N° 2.

Prescripción de entrenamiento en altitud según experiencia previa en altitud



Bibliografía

- 1.- Fulco CS, Cymerman A. "Human performance and acute hypoxia." En: Human Performance Physiology and Environmental Medicine at Terrestrial Extremes. Editado por KB. Pandolf y cols. Pags. 467-95. Indianapolis. Benchmark Press, 1988.
- 2.- Young AJ, Young PM. "Human acclimatization to high terrestrial altitude." En: Id. Pags. 497-543.
- 3.- Laciga P, Koller EA. "Respiratory, circulatory, and ECG changes during acute exposure to high altitude." J Appl Physiol 1976; 41: 159-67.
- 4.- Easton PA, Slykerman LJ, Anthonisen NR. "Ventilatory response to sustained hypoxia in normal adults." J Appl Physiol 1986; 61: 906-11.
- 5.- Cymerman A, Rock PB, Sutton JR, et al. "Operation Everest II: Importance of ventilation in defense of maximal oxygen uptake at extreme altitude." J Appl Physiol
- 6.- Serebrovskaya TV, Ivanshkevich AA. "Effects of a 1-yr stay at altitude on ventilation, metabolism and work capacity." J Appl Physiol 1992; 73:1749-55.
- 7.- Torre-Bueno JR, Wagner PD, Saltzman HA, et al. "Diffusion limitation in normal humans during exercise at sea level and simulated altitude." J Appl Physiol 1985; 58: 989-95.
- 8.- Coates G, Gray G, Mansell A, et al. "Changes in lung volume, lung density, and distribution of ventilation during hypobaric decompression." J Appl Physiol 1979; 46: 752-5.
- 9.- Haab P, Held DR, Ernst H, Farhi LE. "Ventilation-perfusion relationships during high altitude adaptations." J Appl Physiol 1969; 26: 77-81.
- 10.- Stenberg J, Ekblom B, Messin R. "Hemodynamic response to work at simulated altitude, 4000m." J Appl Physiol 1966; 21: 1589-94.

- 11.- Huang SY, Alexander JK, Grover RF, et al. "Hypocapnia and sustained hypoxia blunt ventilation on arrival at high altitude." *J Appl Physiol* 1984; 56: 602-6.
- 12.- Malconian MK, Rock PB, Reeves JT, et al. "Operation Everest II: Alveolar and arterial blood gases at extreme altitude." *J Appl Physiol* 1984; 56: 482-8.
- 13.- Savourey G, García N, Besnard Y, et al. "Pre-adaptation, adaptation y de-adaptation to high altitude in humans: cardioventilatory and haematological changes." *Eur J Appl Physiol* 1996; 73: 529-35.
- 14.- Richalet JP, Souberbielle JC, Antezana AM, et al. "Control of erythropoiesis in humans during prolonged exposure to the altitude of 6542m." *Am J Physiol* 1994; 266: R756-64.
- 15.- Leufaut C, Torrance JD, Reynafarje C. "Shift in the O₂-Hb dissociation curve at altitude: mechanism and effect." *J Appl Physiol* 1971; 30: 625-31.
- 16.- Hannon JP, Chinn KSK, Shields JH. "Effects of acute high altitude exposure on body fluids." *Fed Proc* 1969; 28: 1178-84.
- 17.- Maher JT, Jones LG, Hartley LH, et al. "Aldosterone dynamics during graded exercise at sea level and high altitude." *J Appl Physiol* 1975; 39: 18-22.
- 18.- Milledge JS, Catley DM, Ward ES, et al. "Renin- aldosterone and angiotensin converting enzyme during prolonged altitude exposure." *J Appl Physiol* 1983; 55: 699-702.
- 19.- Burse RL, Cymerman A, Young A. "Respiratory functions and muscle function during isometric handgrip exercise at high altitude." *Aviat Space Environ Med* 1987; 58: 39-46.
- 20.- Cerretelli P, Marconi C, Deriaz O, Giezendanner D. "after effects of chronic hypoxia on cardiac output and muscle blood flow at rest and exercise." *Eur J Appl Physiol* 1984; 53: 92-6.

- 21.- MacDougall JD, Green HJ, Sutton JS, et al. "Operation Everest II: Structural adaptations in skeletal muscle in response to extreme simulated altitude." *Acta Physiol Scand* 1991; 142: 421-7.
- 22.- Reynafarje B. "Myoglobin content and enzymatic activity of muscle and altitude adaptation." *J Appl Physiol* 1962; 17: 301-5.
- 23.- Hoppeler H, Howald H, Cerretelli P. "Human muscle structure after exposure to extreme altitude." *Experientia* 1990; 46: 1185-7.
- 24.- Harris P, Castillo Y, Gibson K, et al. "Succinic and lactic dehydrogenase activity in myocardial homogenates from animals at high and low altitude." *J Moll Cell Cardiol* 1970; 1: 189-93.
- 25.- Howald H, Pette D, Simoreau JA; et al. "Effect of chronic hypoxia on muscle enzyme activities." *Int J Sports Med* 1990; 11(Suppl 1): 510-4.
- 26.- Mizuno M, Carston J, Bro-Rasmussen T, et al. "Limb skeletal muscle adaptation in athletes after training at altitude." *J Appl Physiol* 1990; 68: 496-502.
- 27.- Gore CJ, Hahn AG, Scroop GC, et al. "Increased arterial desaturation in trained cyclist during maximal exercise at 580m altitude." *J Appl Physiol* 1996; 80: 2204-10.
- 28.- Maher JT, Jones LG, Harley LH. "Effects of high-altitude exposure on submaximal endurance capacity of men." *J Appl Physiol* 1974; 37: 895-8.
- 29.- Hortsman D, Weiskopf R, Jackson RE. "Work capacity during 3-wk sojourn at 4300m: effects of relative polycythemia." *J Appl Physiol* 1980; 49: 311-8.
- 30.- Edwards HT. "Lactic acid at rest and work at high altitude." *Am J Physiol* 1936; 116: 367-75.
- 31.- Young AJ, Evans WJ, Cymerman A, et al. "Sparing effect of chronic high-altitude exposure on muscle glycogen utilization." *J Appl Physiol* 1982; 52: 857-62.

- 32.- Mairböurl H, Schobersberger W, Humpeler E, et al. "Beneficial effects of exercising at moderate altitude on red cell oxygen transport and on exercise performance." *Pfügers Arch* 1986; 406: 594-9.
- 33.- Adams WC, Bernauer EM, Dill DB, Bomar JB. "Effects of equivalent sea-level and altitude training on VO₂max and running performance." *J Appl Physiol* 1975; 39: 262-6.
- 34.- Levine BD, Stray-Gundersen J. "Living high - training low: effect of moderate-altitude acclimatization with low-altitude training on performance." *J Appl Physiol* 1997; 83: 102-12.
- 35.- Stray-Gundersen J, Chapman JR, Levine BD. "HILO training improves performance in elite runners." *Med Sci Sports Exerc* 1998; 30: Suppl S-35 (Abstract).
- 36.- Chapman RF, Stray-Gundersen J, Levine BD. "Interindividual variation in response to altitude training." *J Appl Physiol* 1998; 85: 1448-56.
- 37.- Stray-Gundersen J, Alexander C, Hochstein A, et al. "Failure of red cell volume to increase with altitude exposure in iron deficient runners." *Med Sci Sports Exerc* 1992; 24(Suppl): S-90 (Abstract).
- 38.- Ward MP, Milledge JS, West JB. "Peripheral tissues." En: *High Altitude Medicine and Physiology*. Pags. 197-216. Chapman & Hal Medical. Segunda Edicion, 1995.