PubliCE, (PubliCE) 1998

Monograph

Entrenamiento en la Altura

Dr. Manuel Parajón Víscido, MD

Palabras Clave: hipoxia, ácido láctico, hemoglobina, condiciones extremas, consumo de oxígeno

INTRODUCCIÓN

Esta presentación sobre el entrenamiento en altura está basada en información científica, en experiencia propia, y la de otros deportistas que durante años hemos transitado por montañas y altiplanicies en busca de un objetivo deportivo, una aventura o buscando mejoras en el rendimiento. Mientras algunos piensan que competir en la altura es inhumano, quienes disfrutamos el aire más liviano como un regalo más de la naturaleza, aprendimos pacientemente a adaptarnos a ella disfrutando de la acción deportiva.

Cualquier país que trabaja seriamente en busca de alto rendimiento, recurre entre otros medios al entrenamiento en altura, ya sea en centros propios o en otros países que cuenten con ellos. También se ha relacionado el clima de regiones de montaña (altitudes similares a las de entrenamiento) a la salud, con un efecto estimulante que brinda una sensación de mayor bienestar general. Esto es un hecho, sin embargo, existen dudas y controversias en el conocimiento científico acerca de los efectos sobre diferentes aspectos del rendimiento deportivo. Esto se debe a los diferentes métodos de investigación con diferentes protocolos, diferentes altitudes, inclusive aún a igual altitud las condiciones climáticas suelen variar considerablemente y las respuestas de adaptación pueden ser diferentes en cada individuo. Muchos estudios se llevan a cabo en altitudes demasiado elevadas para lograr efectos positivos de adaptación para el rendimiento deportivo y que tienen un efecto paradójico invirtiendo las adaptaciones de altitudes medias. Además este ambiente puede generar alteraciones perceptivas y cognitivas potenciales por la fatiga y la exposición aguda, tomando desprevenidos a quienes no han tenido experiencia en la altura. Este efecto bien conocido en el montañismo, implica que, para predecir una buena adaptación y un buen desempeño en la altura es un requisito haber estado en la altura, cuantas más veces, mejor.

Desde hace tiempo realizan entrenamientos en la altura equipos deportivos y deportistas individuales en nuestro país, en algunos centros acondicionados en forma temporal; pero para facilitar una aplicación sistemática dentro de la estructura de la planificación deportiva se requiere un desarrollo científico - técnico especializado trabajando en forma permanente en el apoyo a los programas de entrenamiento y generando conocimientos.

Nuestro país cuenta con 3000 Km. de cordillera continental hacia el oeste, con diferentes regiones a mediana altitud con fácil acceso, cercanas a aeropuertos y ciudades importantes. Para utilizar este medio ya sea en la búsqueda de mayores rendimientos deportivos y/o para poder competir en la altura, es necesario crear de una vez por todas centros de entrenamiento en altitud de forma permanente.

Clasificación de altura

La palabra atmósfera es de etiología griega y significa Atmos: Gases y aphairo: esfera. Es decir, que es una masa de gases, humos, polvos y vapores (se diferencian por el tamaño de sus partículas) que cubren la superficie terrestre.

Desde el punto de vista físico las moléculas de estos gases que componen la atmósfera se mueven a gran velocidad, tendiendo a difundirse y ocupar cada vez mayor espacio. Esto hace que ejerzan una fuerza expresada por unidad de superficie se denomina presión atmosférica. Esta presión equivalente a 1000 g. por cm2 a nivel del mar, y disminuye con

la latitud.

Existen muchas clasificaciones de altitud, tales como las meteorólogicas y biológicas dependiendo de sus efectos y compatibilidad con la vida humana. Para el montañismo, alta montaña es la que se encuentra por arriba del dímite de las vieves perpetuas, y esta varía con la latitud. Desde el punto de vista biológico se aceptan unos límites relacionados a la altitud divididos de la siguiente manera: baja altitud (hasta los 1000 m.s.n.m.) aquella en la que los individuos sanos no sufren ninguna modificación fisiologica ni en reposo ni en ejercicio. En media altitud (hasta los 2000 m.s.n.m.) se experimentan algunos efectos, afecta el rendimiento físico. En la llamada Alta altitud (hasta los 5500 m.s.n.m.) se observan modificaciones fisiológicas incluso en reposo, siendo muy acentuadas durante el ejercicio. Muy alta altitud (Por encima de los 5500 m.s.n.m.) el efecto deletéreo sobre las funciones fisiologicas es muy marcado. Estos límites no son muy precisos por lo que en ambientes médico deportivos se denomina Altitud moderada a la situada entre los 1500 y 3000 m.s.n.m., siendo estas altitudes donde se encuentran los centros deportivos de altura y donde se realizan competencias y concentraciones.

Cada zona montañosa tiene sus características particulares y regionales, un microclima con diferencias atmosféricas regionales como la Antártida, el Everest, o la cordillera de los Andes; diferencias en el terreno, como la presencia o no de vegetación, nieve, quebradas, etc. también inciden en las sensaciones y en algunos efectos fisiológicos. Este fenómeno es bien conocido por montañistas; por ejemplo en el Himalaya existe vegetación hasta los 5000 metros mientras que en nuestra cordillera central, específicamente en el Aconcagua no hay vegetación a esa altura y los efectos de la altitud son más intensos, según comunicación personal de montañistas himalayistas.

Efectos fisiológicos de la altura

Desde la antiguedad se conocían los efectos de la altura, descriptos ya en los viajes de Marco Polo a través del Tibet, los conquistadores españoles sufrieron los efectos durante la conquista de América. Mientras tanto muchos pueblos habitaron en regiones altas desde hace 10000 años en los Andes y 25000 años en el Tibet. Para algunos pueblos las montañas representaban lugares sagrados donde habitaban dioses y demonios; los Incas transitaron estos dominios llegando a realizar construcciones y a depositar momias en altitudes superiores a los 6000 metros, en lugares difíciles de acceder hoy.

En el siglo XIX Paul Bert, fisiólogo francés, comenzó a estudiar científicamente los efectos de la altura y advirtió que los efectos perjudiciales de las grandes altitudes se debían a la disminución de la presión atmosférica, que induce a una reducción de la presión parcial de oxígeno.

La composición química de la atmósfera es prácticamente uniforme hasta los 20000 metros. Sin embargo la presión y densidad atmosférica son mayores en las capas superficiales de la corteza terrestre y disminuyen en forma exponencial con la altitud. Hay variaciones regionales como las encontradas por la expedición americana al Everest en la que encontraron que la presión barométrica en la cumbre era de unos 17 torr más alta que la predicha por la organización internacional atmosférica estándar de aviación civil.

La razón para las presiones más altas en el monte Everest es que las presiones barométricas entre los 4 y los 16 Km. son marcadamente dependientes de la latitud debido a la presencia de una gran masa de aire frío en la estratósfera arriba del Ecuador, resultantes de un fenómeno de convección y radiación. La cima del Everest se encuentra a 28° de latitud norte y por lo tanto disfruta de esta presión más alta, de no ser así no sería posible ascender sin oxígeno suplementario. La disminución de la presión barométrica y la hipoxia relativa que produce es el efecto físico fundamental que inducirá las diferentes respuestas fisiológicas en altitud.

En general la temperatura disminuye aproximadamente 1° C cada 150 o 180 metros de ascenso pero depende de la orientación del terreno (en las laderas sur y de mayor pendiente los cambios operan más rápidamente que en las norte o de pendiente más suave), también puede producirse en determinados terrenos y en ciertos horarios (según la estación) una inversión de la temperatura con respecto al llano.

La cantidad de vapor de agua en la atmósfera disminuye con la latitud, pero de una manera más rápida que a presión barométrica. Así encontramos que a 2000 m.s.n.m. disminuye un 50% y a 4000 metros, cuando la presión constituye 2/3 de la del nivel del mar. el vapor de agua solo representa 1/4 del existente a 760 mm Hg a nivel del mar. Esta diferencia en la cantidad de vapor explica, en parte el rápido incremento de las radiaciones con la altitud y la perdida corporal de agua que se produce con la estancia en la altitud. Recordemos que el aire inspirado se humidifica con vapor de agua al ingresar por las vías respiratorias y que es aportado por la mucosa respiratoria saturando el aire a 37° C que luego expulsamos en cada expiración perdiendo agua. Este mecanismo está sindicado como el de mayor relevancia en la deshidratación provocada por la altura. Además el viento es un factor potenciador aumentando la pérdida calórica y la deshidratación.

La fuerza de gravedad disminuye en proporción al cuadrado con la distancia al centro de la tierra, disminuyendo la aceleración 0,003086 m/seg. cada 1000 metros de altura por lo que el tiempo de vuelo y la distancia recorrida por un

cuerpo, lanzado con una fuerza determinada será mayor en altura que a nivel del mar.

La exposición a la irradiación solar aumenta con la altitud de la siguiente manera: 2 a 4% cada 100 metros, aproximadamente hasta llegar a los 2000 metros y en 1% cada 100 metros a partir de los 2000 metros. La reflexión de la nieve puede determinar un incremento del 75% al 90% con su presencia. Tanto las radiaciones infrarojas como las ultravioletas siguen el aumento general, si bien las UVB (causantes de las quemaduras solares y de la inflamación de la córnea) parece que aumentan más.

La resistencia del aire también se ve afectada por la altitud ya que disminuye densidad al disminuir la presión barométrica. Este hecho es importante en dos sentidos.

1. Porque la reducción de la densidad del aire reduce el trabajo que deben realizar los músculos respiratorios para vencer la resistencia de las vías aéreas.

2. Porque esta reducción en la densidad del aire también reducirá la resistencia que tiene que vencer un corredor, esquiador o ciclista para mantener una velocidad determinada.

Resumen: El factor físico más importante en la altitud es la disminución de la presión barométrica, que es progresiva conforme subimos a mayores altitudes. Debido a esa disminución disminuye la presión parcial de oxígeno del aire, con lo que baja la presión de oxígeno en la sangre arterial, dando lugar a una hipoxia relativa. También disminuirán la temperatura, la humedad relativa, la fuerza de gravedad y la resistencia del aire. Y aumentarán las radiaciones.

RESPUESTA FISIOLÓGICA AGUDA A LA ALTURA

Consideramos respuesta aguda la puesta en marcha de los mecanismos regulatorios que se producen en el organismo como consecuencia de la exposición súbita a la altitud (hipobaria) hasta el tercer día aproximadamente, considerándose respuesta crónica o adaptación los cambios que se producen a partir de ese día.

En reposo

El factor principal que afecta la respuesta del organismo a la altitud es la disminución de la presión barométrica, que producirá un descenso de la presión parcial de oxígeno en el aire inspirado. Debido a ello, el gradiente de presión entre el alveolo y la sangre venosa del capilar pulmonar disminuirá en la altitud y la presión de oxígeno en la sangre arterial (Pa O_2) se reducirá. Los quimioceptores situados en la aorta y en los cuerpos carotideos, al ser muy sensibles a los cambios en la PaO_2, mandaran impulsos al centro respiratorio para aumentar la ventilación pulmonar. Así pues, la primera respuesta aguda a la altitud es el aumento de la ventilación.

La segunda respuesta es el aumento del gasto cardíaco mediante un aumento de la frecuencia cardíaca, fundamentalmente debido a un aumento de la actividad simpática. Este aumento del gasto cardíaco se produce solo en la respuesta aguda, ya que en estadías prolongadas el gasto disminuye debido a una disminución del volúmen sistólico. La frecuencia puede incrementarse por ejemplo un 10% a 2000 metros durante los 3 primeros días y hasta un 50% a 4500 metros, luego con la aclimatación desciende, por esta razón puede ser utilizada como índice de adaptación.

A nivel hematológico, se observa en esta fase aguda una pérdida de volumen plasmático, que produce una hemoconcentración. Esta hipovolemia parece causada por una serie de factores entre los que se encuentran el aire frío y seco, que aumentará la perdida insensible de agua por las vías respiratorias, asociada a la hiperventilación y un posible aumento de la permeabilidad de la pared capilar. También se aprecia un aumento del pH de la sangre, debido a la pérdida excesiva de CO_2 (hipocapnia) a través de los pulmones por el aumento de la ventilación, dando lugar a una alcalosis respiratoria. Esta alcalosis tarda de dos a cuatro días en compensarse por la excreción de bicabornato por los riñones. Otro efecto hematológico agudo importante es el aumento de 2, 3 - difosfoglicerato, casi inmediatamente después de la llegada a la altitud. Este aumento producirá una disminución en la afinidad de la hemoglobina por el oxígeno, con lo que la curva de disociación de la hemoglobina se desplazará hacia la derecha, favoreciendo la liberación de O_2 a los tejidos.

Durante la exposición aguda, las catecolaminas, los corticosteroides, la hormona antidiurética, las hormonas tiroideas y el glucagón aumentan en forma importante, por el contrario la aldosterona y la renina disminuyen. Mientras que los niveles de insulina se incrementan en la fase aguda, regresan a los valores normales al cabo de una semana. Durante la hipoxia

crónica, en reposo disminuye o no se modifica. La testosterona y las hormonas gonadotroficas aparentemente no se modifican por exposición aguda a la altura. Pasados unos días estos valores se normalizan permaneciendo solamente baja la insulinemia y posiblemente elevadas las catecolaminas.

Metabolismo

Desde el inicio, tanto en la fase de hipoxia aguda como crónica hay una importante disminución en el uso de lipidos como sustrato energético (cociente respiratorio de 0,7) y un incremento en el uso de carbohidratos (cociente respiratorio de 1,0). Varios estudios realizados en altitud confirman el mayor porcentaje de energía partir del consumo de carbohidratos. Un cociente respiratorio más elevado, a una presión alveolar de CO2 incrementa la PO2 alveolar mejorando la disponibilidad de O2 por lo que podria ser considerado un mecanismo compensatorio. En la exposición aguda a la altura, existe una menor glucemia, sin embargo la captación de glucosa libre dentro de la célula (glucocitosis). Esta podría ser otra causa de los niveles bajos de lactato durante el ejercicio y en los nativos.

También durante la fase aguda aumenta la tasa metabólica basal, parece que el efecto depende de la altitud y persiste durante la exposición crónica por arriba de los valores normales. Probablemente se deba al incremento de las catecolaminas pero debe considerarse que este incremento en el consumo diario de energía debe equilibrarse con un aumento en la ingesta alimentaria para minimizar la perdida de peso.

En el sistema nervioso autónomo se produce durante la fase aguda una hiper - simpaticotomía, mientras que en la fase crónica predomina una hiper parasimpaticotomía.

Durante la aclimatación se produce una disminución del agua extra e intracelular, asi como una disminución en el volúmen plasmático, el ejercicio puede confundir o agravar este efecto. Por esta causa suelen observarse disminución en el peso corporal sin disminución real de la masa corporal.

En ejercicio

Cuando se realiza ejercicio físico en altitud, la ventilación y la frecuencia cardíaca se mantienen elevadas por encima de los valores a nivel del mar, para la misma carga de trabajo. Estos cambios no logran compensar el efecto que la hipoxia, debida a la menor PaO2 produce en el consumo máximo de oxígeno y en el rendimiento aeróbico, viéndose estos parámetros claramente disminuidos.

Hasta hace relativamente poco tiempo, era aceptado que el consumo de máximo de O2 disminuía en altitudes a partir de los 1200 - 1500 metros siendo esta disminución mayor cuanto más elevada fuera la altitud. La mayor o menor disminución también dependía de factores individuales . Con respecto a ello, algunos autores pensaban que las personas sedentarias con baja capacidad aeróbica se verían más afectadas en su consumo de oxígeno máximo que las entrenadas con alta capacidad de consumo de O2 . Estudios recientes confirman que la altitud no solo afecta más a deportistas de elite, sino que a partir de 900 metros estos sufren una disminución significativa del consumo de O2 sin que las personas sedentarias se vean afectadas a esa altitud. Factores relacionados con la capacidad de difusión pulmonar en relación con la superficie corporal o en relación al valor absoluto de consumo máximo de O2 se consideran como causa de esta respuesta diferencial. Por otro lado en esta etapa se observan niveles de lactato superiores a los encontrados a una mismo carga de trabajo submáxima a nivel del mar, probablemente mediada por el aumento de catecolaminas.

Como consecuencia de esta respuesta fisiológica, habitualmente se observan algunos sintomas como insomnio, cefaleas, vértigo, apatía, falta de apetito, fatiga prematura durante los esfuerzos físicos, broncoespasmo en hiperreactivos bronquiales, taquiarritmias, hipertensión arterial. Estos síntomas mejoran con la aclimatación gradual y no suelen tener complicaciones en altitudes moderadas.

RESPUESTAS FISIOLÓGICAS CRÓNICAS. ACLIMATACIÓN Y ADAPTACIÓN A LA ALTITUD

Los efectos de la altura son tiempo dependientes y permiten distinguir dos estrategias de regulación biológica para sobrevivir en un ambiente hostil de acuerdo al tiempo de exposición, una de aclimatación y otra de adaptación. Una tercera estrategia comprende los fenómenos regulatorios que pueden cambiar casi instantáneamente en la exposición aguda (ver respuestas agudas). La aclimatación es una adaptacion fenotípica, es decir que se desarrolla en el transcurso de la vida del individuo. Son cambios reversibles que desaparecen al cesar el estímulo hipóxico.

La adaptación es definida como el desarrollo de ciertas características anatómicas y fisiológicas, provocadas por los agentes estresantes del ambiente, y que permiten al ser vivo vivir en la altura sin necesidad de cambios en su organismo. Las adaptaciones son pregresiva y genéticamente fijadas, y son permanentes. La capacidad de adaptación puede ser un rasgo genéticamente fijado de un individuo o de una especie.

En los individuos nacidos en la altura suelen encontrarse algunas modificaciones estructurales tales como el aumento del diámetro torácico, mayor hipertrofia cardíaca, y otras modificaciones estructurales y funcionales. En algunos animales se observa una adaptación genética, como por ejemplo la llama, el guanaco, o la oca cenicienta que vuela a 8000 metros de altitud.

Cuando la estadía en altitud se prolonga unos días se producen una serie de adaptaciones fisiológicas en el organismo (algunas iniciadas desde el primer momento y otras de aparición más tardía) encaminadas a compensar la menor presión de O2 en el aire inspirado.

Respiración

A pesar de que la concentración de O2 en la atmósfera no cambia, la presión parcial si lo hace ostensiblemente. Si una persona no aclimatada asciende en poco tiempo a una altitud moderada, o alta sufre una serie de síntomas, conocidos como mal agudo de montaña. La base del problema parece estar en la pérdida excesiva de CO2 por los pulmones y la consecuente pérdida de bicarbonato, junto a la relativa hipóxia, favorecen la salida de iones de potasio desde el compartimiento intracelular al extracelular. Los mecanismos que pueden llevar a esta situación son los siguientes:

El descenso de la PO2 atmosférica y de la PO2 alveolar produce la estimulación de los quimioreceptores periféricos, especialmente de los cuerpos carotídeos, pero no de los del SNC. Esta estimulación incrementa la ventilación alveolar, por aumento de la profundidad y frecuencia respiratoria y disminuye el espacio muerto respiratorio; ambos cambios llevan a una mayor pérdida de CO2 y descenso de la PCO2 por lo tanto al establecimiento de hipocapnia arterial (alcalosis respiratoria). La hipóxia también puede generar una vasoconstricción en la circulación pulmonar y elevar la presión media de perfusión, llegando a generar cuadros de hipertensión pulmonar. Todos estos mecanismos se hacen más notorios en grandes altitudes de entrenamiento.

La ventilación permanece aumentada durante toda la estadía en altura. Sin embargo las personas que nacen y viven en altura presentan una respuesta completamente diferente, pues tienden a hipoventilar y a mantener un menor gradiente alveolo-arterial de O2 , prsiblemente debido a que tienen una mayor capacidad de difusión pulmonar y una mayor densidad capilar pulmonar.

La hiperventilación que se realiza en altitud irá acompañada de una disminución de la PaCO2 (hipocapnia), que se acompaña de un aumento del pH en el líquido cefaloraquídeo, ya que CO2 atraviesa f´cilmente la barrera hematoencefálica. Para evitar que el líquido cefaloraquídeo se alcalinice, se excreta bicarbonato del LCR, lo cual mantiene el estímulo sobre los quimiorreceptores periféricos. Esta hipocapnia puede provocar vasoconstricción cerebral.

Transporte de oxígeno

Después de unos 3 a 6 días el gasto cardíaco disminuye, tanto en reposo como en ejercicio submáximo debido a una disminución del volúmen sistólico.

Algunos autores opinan que después de períodos muy largos de aclimatación el gasto puede acercarse a valores obtenidos a nivel del mar. En grandes altitudes la frecuencia cardíaca máxima disminuye, llegando a valores como de 135 latidos por minuto; quizás pueda entenderse este fenómeno como un mecanismo de protección ante requerimientos metabólicos en esfuerzos excesivos en hipóxia hipobárica.

El 2,3-DPG se mantiene elevado durante la estancia en altitud con el correspondiente efecto de desplazamiento a la derecha sobre la curva de disociación de la hemoglobina, favoreciendo la liberación de O2 a los tejidos.

La producción de glóbulos rojos que comienza durante la exposición aguda a partir de los 1500 metros (entre los 3 a 5 días de estadía) se hace palpable aproximadamente a las dos semanas aproximadamente. El origen de esta producción es el estímulo que realiza la hipoxemia a nivel renal, produciendo un aumento en los niveles de eritropoyetina que llega a punto máximo aproximadamente al mes, que a su vez estimulará la producción de eritrocitos en la médula ósea. El volumen plasmático permanecerá disminuido durante aproximadamente dos meses.

El consumo máximo de O2 mejora durante el período de aclimatación, debido a la mejora del transporte de O2 , pero sin llegar a los valores alcanzados a nivel del mar.

Hormonas

Las modificaciones hormonales son de difícil valoración por la cantidad de factores externos que influyen en las personas expuestas a la altitud, como son el frío, el estrés, el ejercicio físico, etc. lo cual da resultados contradictorios. De los pocos estudios existentes se puede concluir que los niveles de catecolaminas están aumentados durante las estadías en altitud y en personas aclimatadas, tanto en reposo como en el ejercicio, al igual que la hormona del crecimiento (HGH).

Los ejercicios en alturas extremas (superiores a 4000 metros) originan una elevación de la HGH. Por otra parte, en estudios de autores como Reynaud, la HGH está mas elevada en reposo en los nativos de las montañas que en los habitantes de nivel del mar. Estos, al ascender en la montaña, aumentan los niveles de reposo, aunque no alcanzan los encontrados habitualmente en los nativos. Tras un ejercicio efectuado en estas cotas, los niveles plasmáticos de HGH se elevan más en los montañeros frente a los valores encontrados en los nativos para el mismo esfuerzo.

Igualmente, y de acuerdo con los diversos autores, la HGH en estas altitudes posee un período de liberación más tardío y de menor vida media en los montañeros, por un posible defecto en el aclaramiento hormonal.

Metabolismo muscular

En este apartado es donde existe mayor controversia entre diferentes investigadores. El hecho de que las modificaciones a nivel del metabolismo muscular van a influir mucho en el rendimiento y que los cambios son más duraderos que las adaptaciones que las logradas por otros medios, hacen esto más interesante no solo para las estancias en altitud sino para el posterior regreso a nivel del mar. El sentido y la magnitud de esas modificaciones nos pueden ayudar a conocer los factores que estimulan o inhiben las vías energéticas. Por la relación que tienen entre si todos los componentes musculares, se consideran bajo el mismo epígrafe todas las modificaciones tanto histológicas como metabólicas.

Resumen de las adaptaciones principales y las que se producen a mediana altitud. Durante el ejercicio exhaustivo en altura se ha encontrado que los sustratos de nucleótidos de adenina fueron menos depletados y hay una menor degradación de glucógeno. Mientras tanto un elevado pH intramuscular, y bajas concentraciones de lactato en músculo y sangre se encontraron en sujetos aclimatados.

Masa muscular

La mayoría de los autores coincide en que durante estancias muy prolongadas en altitud hay una pérdida de masa corporal, sobre todo por encima de los 5000 metros. Existen pocos estudios al respecto. Sin embargo, en estudios llevados a cabo a 5050 metros por B. Kayser encontraron que la hipertrofia muscular en flexores del codo era 2/3 de la del nivel del mar, asi parece ser que la hipóxia crónica reduce el potencial para la hipertrofia del músculo esquelético humano. Probablemente este efecto se deba a alteraciones hormonales como la disminución de los valores de insulina. Si bien la hormona del crecimiento aumenta durante el ejercicio en hipóxia aguda, la acción sobre el músculo esquelético es probablemente mediada por el factor de crecimiento insulínico. Por otro lado en altitudes de 2000 metros la masa muscular no sufre efectos importantes. Grosor de fibras: Después de estancias superiores a los 4000 metros se aprecia una reducción del tamaño de las fibras musculares, principalmente debido a la pérdida de proteínas miofibrilares. Aún no se ha podido diferenciar si esto se debe al efecto de la hipóxia o a la atrofia fisiológica debido a la menor cantidad de la actividad física y/o nutricional.

Mitocondrias

Los estudios en los que se ha valorado la cantidad (volumen) de mitocondrias en el musculo, después de estancias en altura, muestran datos muy contradictorios; en algunos de ellos se aprecia un mayor número de mitocondrias pero de menor tamaño. Otros autores han mostrado aumentos en la cantidad de proteínas mitocondriales o en el volumen relativo, evidenciando una posible activación de las estructuras responsables del metabolismo aeróbico. Por contraposición a esos resultados, estudios recientes, pero realizados tras estancias superiores a 6000 metros, muestran disminución en el volumen total de mitocondrias musculares de casi un 20%.

La divergencia entre estos estudios (algunos de ellos realizados por los mismos autores, con la misma metodología) solo es explicable por las diferentes altitudes utilizadas y por la influencia del ejercicio físico y de una nutrición incorrecta.

Mioglobina

La mioglobina realiza una importante función en la fibra muscular, facilitando el transporte de oxígeno del capilar a la mitocondria y además como almacén de O2 . También podría tener la función de matener suficientemente baja la presión intracelular de O2 para facilitar el gradiente de difusión del oxigeno capilar al interior de la célula. En el músculo humano los datos son muy escasos, aunque parecen indicar que las personas que nacen en altura, las concentraciones de

mioglobina son mayores, mientras que las que realizan un período de aclimatación en altitud, en algunos casos aumenta y en otros no. Algunos estudios encontraron después de un período de entrenamiento intensivo, una disminución de la mioglobina en deportistas de élite, mientras que en situaciones de altitud, cuando el estímulo de hipóxia es suficientemente intenso, se producen en el músculo entrenado aumentos significativos en la concentración de mioglobina.

Capilares

Los estudios llevados a cabo en alturas moderadas muestran una clara tendencia a que aumente la densidad capilar en el músculo, se discute si hay un aumento de la densidad capilar o si se debe a la disminución del tamaño de la fibra muscular. En este último caso mejora la distancia de difusión de los nutrientes.

Utilización de sustratos

En los pocos estudios realizados en seres humanos, se ha observado que durante el ejercicio submáximo en exposición aguda hay un aumento en la movilización de ácidos grasos libres y de su metabolismo. También se observó que después de un período de aclimatación de 18 días a 4300 metros (altitud elevada) , los niveles de ácidos grasos libres en reposo eran tres veces superiores a los de nivel del mar, y que realizando ejercicio submáximo, al 85% del VO2 máx. la deplección de glucógeno era mayor, lo que evidenciaba una mayor utilización de grasas. Este aumento en la movilización de ácidos grasos puede atribuirse al incremento de catecolaminas.

Metabolismo glucolítico

Cuando se estudiaron las actividades de las enzimas glucolíticas en animales no se encontraron cambios con respecto a nivel del mar. Sin embargo cuando se estudiaron en seres humanos se observaron grandes discrepancias. En estudios a 2300 metros con deportistas de élite, con grupo control mostraron una disminución de enzimas glucolíticas (PFK y LDH) en el grupo que enctrenaba en altitud.

Metabolismo oxidatvo

En el estudio mencionado anteriormente se abservó un aumento significativo de las enzimas oxidativas. Cuando se utilizó un modelo de ejercicio con una sola pierna, utilizando la otra como control, para poder realizar la misma intensidad y volumen de entrenamiento en valores absolutos, en altitud y a nivel del mar durante cuatro semanas, las piernas que entrenaron a nvel del mar aumentaron sus enzimas oxidativas, pero las que entrenaron en altura aumentaron significativamente mayor.

Capacidad tampón (buffer)

Mizuno et. al. (1990) realizaron un estudio de esta capacidad en relación a la altitud; en el se ha comprobado que después de un período de entrenamiento en altitud moderada de 2500 - 3000 metros, un grupo de esquiadores de fondo, de alto nivel, mostraron un VO2 máx. estable en diferentes tests. Sin embargo, encontraron que el déficit maximo de O2 se había incrementado y esto reflejaba mejor rendimiento en carreras cortas. Biopsias musculares mostraron una capacidad buffer incrementada en el tejido muscular y dicha mejora se correlacionaba con una mejora de la capacidad anaeróbica glucolítica.

Energética del metabolismo muscular en altura.

El costo neto de energía de la contracción muscular no cambia en la exposición aguda o crónica (Carretelli 1980). Por lo tanto, la eficiencia mecánica del ejercicio, por ejemplo ciclismo, remo, es la misma. La energía necesaria para ejercicios de resistencia es esencialmente derivada del metabolismo aeróbico. Una disminución de la fracción inspirada de O2 (PIO2) lleva a un decremento de la capacidad aeróbica máxima (VO2 máx). La relación entre PIO2 y el % del VO2 a nivel del mar no es lineal, teóricamente refleja la forma de la curva de disociación del oxígeno (Ferreti 1990). Esto podría explicar porque atletas desaturan más que los sedentarios (Powers et. al. 1988), por lo que experimentan una mayor caída en el VO2 máx. cuando ejercitan en hipóxia. Otros estudios describen una mejora en la eficiencia mecánica en la carrera luego de 20 días de entrenamiento en altitudes moderadas.

Valoración de los efectos posteriores a la altitud

Consumo máximo de oxigeno: Es difícil hacer una valoración exacta pero algunos autores opinan que la altitud tiene un efecto más positivo en los deportistas con valores más bajos de VO2 máx lo cual es lógico pues cuando se tienen valores elevados de VO2 es más difícil mejorarlo.

Adaptaciones hematológicas

El aumento de 2,3-DPG desaparece rápidamente al regresar al nivel del mar. Al regresar de un período de estancia en altitud se observa un aumento en los valores de glóbulos rojos y hemoglobina en sangre así como un volumen plasmático disminuido. El aumento de glóbulos rojos podría ser una ventaja para el transporte de oxígeno al músculo, sobre todo cuando el gasto cardíaco regrese a valores normales (3 a 5 días del retorno al nivel del mar).

Las mejoras claras de los niveles de eritropoyetina se han observado a partir de los 3000 metros, aunque efectos practicos en altitudes como la de ciudad de México (2300 metros) se observan niveles elevados de glóbulos rojos en sus habitantes. Hay que tener en cuenta que solo el riñón nota los niveles de PO2 normalizado; se disminuye la producción de eritropoyetina y la fabricación de GR, con lo que en un período corto (No se sabe con exactitud) el deportista vuelve a sus niveles de pre - altitud. Algunos autores consideran que el hematocrito no aumenta debido al aumento de GR, sino por la disminución del volúmen plasmático y que, para que aumente claramente la hemoglobina se necesitan de 3 a 4 semanas de estancia en altitud. No se conoce con exactitud la duración de las mejoras a nivel hematológico a la vuelta a nivel del mar.

Adaptaciones respiratorias

La hiperventilación que se observa a grandes alturas continúa varias semanas después del retorno a nivel del mar, aunque en un primer momento al perderse el estímulo de la hipoxia en los quimioreceptores periféricos, se reduce la ventilación. Esta disminución de la ventilación hará que aumente la PCO2 por encima de los valores anteriores; el aumento en la PCO2 elevará los niveles de CO_2 en el líquido cefaloraquídeo, lo cual bajará el pH y estimulará los quimioreceptores centrales y aumentará la ventilación. Por ello, la hiperventilación continua varias semanas después de la vuelta a nivel del mar, hasta que los valores de bicarbonato del LCR vuelven a la normalidad. Si bien no parece que el aumento de la ventilación máxima puede influir en los valores del VO2 max, ya que la ventilación no se considera un factor limitante, algunos autores consideran que podría ser beneficiosa en algunos deportes.

Adaptaciones metabólicas

Uno de los factores principales para el rendimiento aeróbico y el metabolismo energético, es la mayor o menor densidad capilar en el músculo. Se conoce que la exposición a la hipoxia favorece la proliferación de capilares musculares; también es un hecho conocido que el entrenamiento de resistencia también produce esos cambios; está por verificarse todavía si ambos estímulos en deportistas de alto nivel, se potencian o no. En estudios bien controlados se observa una tendencia al aumento de la densidad capilar.

Otro de los factores fundamentales para el metabolismo energético muscular es la actividad de las encimas oxidativas. Teniendo en cuenta los pocos datos disponibles hasta la fecha, se podría concluir en forma preliminar que el entrenamiento en altitud es beneficioso para el metabolismo oxidativo muscular y el rendimiento aeróbico siempre que se mantengan los mismos niveles de entrenamiento. En caso contrario, dicho entrenamiento será negativo, por lo que, cuando no sea totalmente seguro que en altitud se van a poder mantener las mismas cantidades de entrenamiento que se harían a nivel del mar, es preferible no entrenar en altitud buscando una mejora aeróbica. Este comportamiento diferenciado del metabolismo aeróbico podría explicar los contradictorios resultados en el consumo máximo de oxígeno que se obtienen, algunas veces, a la vuelta de períodos de entrenamiento en altitud.

El otro gran componente del metabolismo energético muscular son las enzimas de la vía anaeróbia. Desde un punto de vista teórico, cuando se quiere entrenar de una manera anaeróbica, este entrenamiento se verá favorecido por la altitud, debido a la hipoxia que ello implica. En varios estudios en lo que se valoró el rendimiento en pruebas de gran componente anaeróbio se observaron mejoras después de estancias en altitud en la que se realizó un entrenamiento de tipo anaeróbio. Estas mejoras no pueden achacarse a mayor cantidad de fosfatos de alta energía, ni a una mayor actividad de enzimas glucolíticas (Aumentan en estadías prolongadas a gran altitud).

La tercera causa que puede ser atirbuible a una mayor capacidad tampón del musculo esquelético. Un estudio realizado al respecto en músculo humano ha mostrado una mejora en el rendimiento anaeróbio.

Estudios realizados en los altiplanos de Kenia abren también nuevas perspectivas, pues orientan sobre la idea de que el entrenamiento en altitud puede mejorar los valores de déficit acumulado de oxígeno, lo que implica mejora de la capacidad anaeróbia. También parece que disminuye la producción de amoníaco en el músculo en ejercicio, o aumentan su aclaramiento.

En resumen, el entrenamiento en altitudes moderadas puede tener un efecto beneficioso en el metabolismo muscular, pero teniendo en cuenta que hay que mantener unos niveles de entrenamiento similares en intensidad y volumen a los que se realizarían a nivel del mar, hay que enfocar el entrenamiento para mejora un solo componente metabólico, hay que plainficar en que momento o momentos de la temporada se realiza y hay que individualizar las cargas de entrenamiento. Además debido a la respuesta tan individualizada de los deportistas a la altitud, es conveniente realizar una estancia previa en altitud para valorar esas respuestas.

MÁXIMA PERFORMANCE EN ALTITUD Y FATIGA MUSCULAR

Como es bien sabido, la intensidad del ejercicio máximo invlucrando grandes grupos musculares decrece en la altitud. Esta reducción en la potencia máxima es mayor a mayor altitud, y no parece ser influenciada por la aclimatación (Cerretelli, 1980; Ward, et. al. 1990). Por lo contrario, durante el curso de la aclimatación la máxima acumulación de lactato en sangre como consecuencia de un ejercicio de alta intensidad decrece progresivamente. (Eduards, 1936; Cerretelli 1980; West, 1986). Este fenómeno también es conocido como la "paradoja del lactato" aún no tiene explicación. En sujetos aclimatados a gran altitud (5000 metros.) biopsias del musculo vasto lateral tomadas inmediatamente despues de un test progresivo de ciclismo mostraron que en el agotamiento, el sustrato de energía nucleótido de adenina fué menos deplectado, tenía menos lactato acumulado, menos glucógeno degradado mientras que el pH muscular era más elevado comparado con las mismas condiciones a nivel del mar (Green et al. 1989). Un alto pH muscular y bajo nivel de lactato también fué confirmado por otros autores (Bender, et. al.; Green et. al.; Young et al.). Varias hipotesis han sido investigadas para explicar este fenómeno, como la disminución de la capacidad buffer, la capacidad de la exitabilidad de las motoneuronas alfa en el sistema nervioso central provocadas por la hipoxia hipobárica a partir de estudios realizados por B. Kayser, se realizaron determinaciones electromiográficas y metabolicas de los factores que limitan la performance y la influencia de la masa muscular en la fatiga, no encontraron signos de fatiga, electromiográficos ni metabólicos. Una conclusión de estos trabajos es que la fatiga en grandes altitudes, en hipóxia crónica y para esfuerzos de grandes grupos musculares, el sistema nervioso central (SNC), tiene un papel limitante en esfuerzos llevados hasta el agotamiento. A gran altura la contribución diafragmática a la ventilación durante el ejercicio decrece en el tiempo. Esta fatiga diafragmática puede contribuir, via inhibición refleja a una limitación de la activación motora en gran altitud. Sin embargo, queda abierta otra cuestión y otros posibles mecanismos, como la disminución de la disponibilidad de O2 en el SNC, esto también podría jugar un rol impotante.

Según Mishchenko y Monogarov al realizar trabajo pesado, sobre todo en altura, la disminución de la concentración de bicarbonato sería el responsable de la disminución de la aparición de lactato en sangre, provocando acidez intracelular y alcalosis extracelular, lo cual provoca fatiga muscular local como factor limitante en las cargas físicas efectuadas en la altura. Mediciones de pH muscular pos ejercicio mostraron valores significativamente más elevados que a nivel del mar. Podría postularse que existe un díficit en el transporte de protones H o de lactato pero se contradice con algunos hechos tales como la distribución en los compartimentos intra y extracelular de lactato es similar a la de normoxia b) La cinética arterial de lactato durante la recuperación post esfuerzo supramáximo hasta el agotamiento es similar a la de normoxia c) El pH muscular es más alcalino. d) En el agotamiento el lactato arterial y muscular son más bajos que en normoxia.

Según Davies una alcalosis respiratoria a nivel del mar provoca un incremento en los niveles de lactato o una mayor capacidad glucolítica. Por lo tanto el efecto de aumento de la ventilación luego de la exposición a la altitud podría actuar por este mecanismo mejorando el rendimiento en esfuerzos supramáximos.

CONCLUSIÓN

El entrenamiento en altura es un recurso especial para generar una sobrecarga adicional que afecta al deportista en su totalidad. El momento de aplicación puede variar según el objetivo perseguido, puede ser el de mejorar la performance para competir en el llano (baja altitud) o para competir en altitud. En este último caso es importante conocer la altitud de la prueba pero sabemos que los efectos perjudiciales son dependientes de la misma, por lo que respetando el principio de la sobrecarga parece lógico no alcanzar repentinamente alturas elevadas para entrenar, sobre todo si sobrepasan los 3000 metros, algo habitual en Sudamérica. Las alturas de entrenamiento varían en un rango de 1700 a 2500 metros según diferentes autores sin embargo recomendable un rango entre 2000 y 2500 metros como máximo. Para entrenar en mayores altitudes, es razonable hacerlo en altitudes escalonadas inclusive con ascensos y descensos respetando los mecanismos de adaptación para cada altura, tal como se hace en el montañismo para evitar una caída brusca y significativa de la carga absoluta de trabajo y los efectos negativos de la hipoxia hipobárica por encima de las altitudes moderadas. Podemos esperar mejoras en la resistencia de base, en la resistencia a la fuerza, mejorar la capacidad buffer en el músculo esquelético para una mayor capacidad glucolítica anaeróbica, una mayor tolerancia a la fatiga y una mayor recuperación en períodos de competencia, mayor control de destrezas técnico tacticas (bajo condiciones afectadas por la hipoxia)

Cuando se plantea la necesidad de realizar entrenamiento en la altura es conveniente tener en cuenta previamente las evaluaciones médica, antropométricas y de capacidades condicionales del deportista. Aunque parezca obvio, conocer exactamente la altitud a la que se va a entrenar, el terreno y las condiciones climáticas de la misma. Sobre estos datos datos es posible determinar los objetivos y utilizarlos de manera conveniente dentro de la estructura de la planificación.

De esta manera, durante la fase aguda o de acomodación (3 a 5 días iniciales) se harán las siguientes recomendaciones generales:

- Al arribar moverse con cautela y no hacer trabajos intensivos de ningún tipo.
- Alimentarse con regularidad y moderación con una dieta rica en carbohidratos e hidratarse.
- Protegerse de la radiación ultravioleta con cremas pantallas y anteojos anti UV.
- Realizar controles de peso e hidratación
- Controles médicos y bioquímicos
- La actividad física o entrenamiento debe ser de baja intensidad, con pausas más prolongadas.
- Antes de partir debe constatarse un buen estado de salud, buena capacidad aeróbica y anaeróbica.

Luego de la acomodación le sigue el período de adaptación gradual de los mecanismos fisiológicos compensatorios que permiten una mayor capacidad de trabajo, según algunos autores puede durar de 3 a 6 semanas para una mayor eficacia del entrenamiento.

Durante este período la carga puede incrementarse gradualmente tanto en la resistencia aeróbica como en la velocidad, resistencia de fuerza y areas anaeróbicas. En la medida en que la aclimatación mejora las respuestas a la carga impuesta (factores individuales) se producirán mejoras en el rendimiento. Al final es recomendable 2 o 3 días de descarga.

Al regreso a baja altitud le sigue una fase de readaptación durante la cual aparecen algunos síntomas como irregularidad respiratoria, bradicardia, sensación de fatiga al esfuerzo, que se van regularizando gradualmente. Los efectos de la altura pueden evidenciarse entre los 7 y los 30 días de esta fase.