

Efectos hematológicos inducidos por los programas de hipoxia intermitente

Hematological effects induced by programs of intermittent hypoxia

Domingo J. Ramos Campo, Fernando Martínez Sánchez, Paula Esteban García, Jacobo. A. Rubio Arias, Susana Mendizábal Albizu, J. Fernando Jiménez Díaz

Facultad de Ciencias del Deporte de Toledo. Universidad de Castilla-La Mancha. España.

CORRESPONDENCIA:

Domingo J. Ramos Campo
domingojesusramos@gmail.com

Recepción: abril 2012 • Aceptación: abril 2013

Resumen

Entre las estrategias de entrenamiento en condiciones de altitud simulada más utilizadas destaca la exposición a hipoxia intermitente (*IHE*), la cual se aplica mediante la estancia pasiva en habitaciones con ambiente hipóxico o a través de la respiración de aire con menos concentración de O_2 , junto con el método denominado entrenamiento en hipoxia intermitente (*IHT*), que consiste en llevar a cabo sesiones de entrenamiento en condiciones de hipoxia (Millet, Roels, Schmitt, Woorons & Richalet, 2010).

Los efectos de los programas de exposición y entrenamiento en hipoxia intermitente se relacionan con un incremento de la eritropoyesis que deriva en una mejora de parámetros fisiológicos relacionados con el rendimiento, como el umbral anaeróbico o el consumo máximo de oxígeno y un incremento del rendimiento anaeróbico.

Tal como observamos en la literatura, los programas IHT parecen ser mucho más beneficiosos que los de IHE para estimular la eritropoyesis e incrementar el rendimiento deportivo, si bien con ambos métodos se observa una mejora en los valores sanguíneos claves para la neoformación de glóbulos rojos y que afectan al rendimiento deportivo. Fundamentalmente esto se debe a que el ejercicio en hipoxia juega un rol importante en las adaptaciones hematológicas y fisiológicas del organismo, si bien en este campo de investigación aún hay preguntas básicas que deben ser contestadas (Hoppeler & Vogt, 2001).

Palabras clave: entrenamiento en hipoxia intermitente, exposición a hipoxia intermitente, altitud simulada, hipoxia intermitente, live low train high.

Abstract

Among the various simulated altitude training approaches, intermittent hypoxia exposure (IHE) should be highlighted, which is implemented through the passive stay in rooms with hypoxic ambience or by breathing air with a lower concentration of O_2 , as well as the method called intermittent hypoxic training (IHT), which consists of carrying out training sessions under conditions of hypoxia (Millet et al., 2010).

The effects of intermittent hypoxic exposure and intermittent hypoxic training programs are associated with increased erythropoiesis resulting in an improvement in physiological parameters related to aerobic performance and anaerobic threshold and maximum oxygen consumption as well as increased anaerobic performance.

As noted in the literature, IHT programs appear to be much more beneficial than IHE for stimulating erythropoiesis and enhancing athletic performance, although both methods result in an improvement in blood levels that is key to the new production of red blood cells and that affects athletic performance. Primarily, this is because exercise in hypoxia plays an important role in haematological and physiological adaptations of the body, although in this research there are still basic questions to be answered (Hoppeler & Vogt, 2001).

Key words: Intermittent Hypoxia Training, Intermittent Hypoxia Exposure, simulated altitude, Intermittent hypoxia, LiveLow-TrainHigh.

Introducción

En la actualidad, los deportistas de alto nivel incorporan a su entrenamiento diferentes programas o medios de entrenamiento en condiciones de altura o hipóxicas. Por un lado encontramos los modelos tradicionales *vivir en altura-entrenar en altura* (*Live high-train high*, LHTH), *vivir en altura-entrenar a nivel del mar* (*live high-train low*, LHTL) y *vivir a nivel del mar-entrenar en altura* (*live low-train high*, LLTH) de los cuales han surgido nuevas estrategias de aplicación que han hecho que recientemente se genere un interés por la investigación y utilización de métodos de hipoxia. Dentro de estos destaca la *exposición a hipoxia intermitente* (*intermittent hypoxic exposure*, IHE) la cual se aplica mediante la estancia pasiva en habitaciones con ambiente hipóxico o a través de la respiración de aire con menos concentración de O₂. Otro método utilizado es el denominado *entrenamiento en hipoxia intermitente* (*intermittent hypoxic training*, IHT), que consiste en entrenamiento en condiciones de hipoxia (Millet et al., 2010).

Recientemente, ha surgido un debate sobre las posibles diferencias entre la utilización de hipoxia hipobárica o normobárica, siendo un tema candente en la literatura (Millet, Faiss, Pialoux, Mounier, & Brugniaux, 2012). A pesar de las diferencias sustanciales entre los diferentes métodos de hipoxia, todos tienen el objetivo el estimular la eritropoyesis del deportista y que se generen adaptaciones que mejoren su rendimiento físico al nivel del mar. Por lo tanto, un incremento de la capacidad de transportar oxígeno en la sangre hace que se produzca una mejora del metabolismo aeróbico como el incremento del VO₂ max, el aumento de los umbrales ventilatorios y lácticos o la mayor economía del movimiento deportivo. Todos los factores citados han sido objeto de estudio en el campo de la investigación con programas de hipoxia intermitente.

De esta forma, la presente revisión sistemática pretende clarificar los efectos que los programas de hipoxia intermitente, siguiendo programas de exposición (IHE) o entrenamiento en condiciones de hipoxia intermitente (IHT), producen sobre los diferentes parámetros hematológicos que pueden orientarnos hacia una estimulación de la eritropoyesis y que por lo tanto pueden ver aumentado el rendimiento.

Antecedentes

En deportistas de resistencia, la capacidad de los músculos de recibir y consumir oxígeno supera la capacidad del sistema cardiovascular para transportarlo (Wagner, 2000). Debido a ello, la teoría más común

sobre el mecanismo para incrementar el rendimiento a consecuencia de un programa de hipoxia se relaciona con el aumento de la capacidad de transportar oxígeno en sangre. Esto se produce por un cambio en los parámetros hematológicos, fundamentalmente por el incremento de la secreción de la hormona EPO, Hb y eritrocitos (Levine, 1997; Levine & Stray-Gundersen, 2005; Stray-Gundersen, Chapman, & Levine, 2001). La mayoría de los estudios encontrados en la literatura realizan mediciones de numerosas variables hematológicas que tienen una implicación clave en la eritropoyesis. Sin embargo, es difícil unificar criterios e interpretar los resultados debido a los datos omitidos y a la falta de grupo control en algunos de estos estudios.

El logro de adaptaciones hematológicas en el organismo asociadas a un incremento de rendimiento deportivo es el objetivo principal de la aplicación de cualquier programa de hipoxia. Cuando el cuerpo se encuentra en altitud natural o simulada, todas las células del organismo detectan las condiciones de falta de O₂. Algunas de las células son más sensibles a la hipoxia que otras, siendo el riñón el primer lugar donde se detecta este déficit de O₂ (Maxwell, Lappin, Johnston, Bridges, & McGeown, 1990).

La respuesta del organismo a este estímulo produce un incremento en la secreción de eritropoyetina. El aumento de la concentración de esta hormona precede al proceso de estimulación de la eritropoyesis en la médula ósea y al crecimiento del número de eritrocitos. Por lo tanto, la mayor producción de eritropoyetina derivará en un incremento de la producción de glóbulos rojos y en una mejora de la capacidad de transporte de oxígeno en sangre.

El proceso temporal para llevar a cabo esa estimulación de la eritropoyesis depende del tipo de exposición a hipoxia (aguda, crónica o intermitente) al que sometamos al deportista. Investigaciones previas (Eckardt & Bauer, 1989; Eckardt, Boutellier, Kurtz, Schopen, Koller, & Bauerl, 1989) describen la dinámica temporal que tiene la producción de la hormona eritropoyetina, encontrando un aumento significativo en sus niveles después de 85 minutos de exposición a hipoxia hipobárica que simulaba una altitud de 4000 m.

Otros estudios con hipoxia normobárica muestran cambios en la secreción de eritropoyetina después de una exposición de tan solo 5 minutos con un FiO₂ del 10.5% (Knaupp, Khilnani, Sherwood, Schraf, & Steinberg, 1992). Estos cambios comienzan a ser significativos cuando la exposición tiene una duración de 120 minutos.

Además, hay que destacar que existe una gran variación individual en la respuesta de la eritropoyetina en todos los estudios de la literatura, observando es-

tudios con rangos del -41% al 433% de modificación con respecto a los valores basales después de 24 horas de altitud simulada en 48 atletas (Jedlickova et al, 2003) o del 10-185% en nadadores junior expuestos a 4 horas de hipoxia intermitente (Friedmann, Frese, Menold, Kauper, Jost, & Bartsch, 2005).

La secreción de hormona eritropoyetina sufre modificaciones a lo largo del día. Algunos autores pensaban que las diferencias encontradas en los estudios de exposición a hipoxia se debían a esta dinámica y no a una estimulación de su secreción por la hipoxia. Sin embargo, posteriores estudios que miden la concentración de esta hormona a lo largo del día muestran que la variación diaria es del 15% (Klaursen, Robinson, & Micahel, 1996). Por lo tanto, a pesar las fluctuaciones diurnas en la concentración de eritropoyetina, los resultados de los estudios nos hacen pensar que los cambios hematológicos se producen por exposiciones a hipoxia de corta duración, siendo este método un sustituto adecuado a los métodos de exposición de larga duración (naturales o simulados). Sin embargo, la vida media de esta hormona es relativamente corta, por lo que se requiere una dosis de hipoxia crítica para lograr producir un estímulo adecuado para incrementar la eritropoyesis (Dobson, 2009). Además, se ha observado que también se produce un cambio de la afinidad Hb-O₂ (Cerrete-lli & Samaja, 2003), debido a la mayor diferencia de pH entre la sangre venosa y arterial, favoreciendo de esta forma un transporte de O₂ más adecuado para las nuevas condiciones de hipoxia.

Estado actual del tema

Adaptaciones hematológicas a la IHE

Existen trabajos contradictorios sobre la eficacia de los programas de IHE sobre la eritropoyesis. De esta forma encontramos el estudio de Abellan et al. (2005), que aplicaron un programa de IHE en 16 triatletas de género masculino. El protocolo, de 4 semanas de duración, constaba de 3 horas al día de exposición, durante 5 días a la semana, con un incremento progresivo de altitud simulada (4000-5000 m). Los resultados de este estudio muestran un incremento significativo del 440% en la segregación de EPO tres horas después de la sesiones de IHE. Sin embargo, no se observan cambios significativos en otros parámetros hematológicos medidos (reticulocitos, eritrocitos, plasma total y transferrina). Por lo tanto, el autor afirma que 180 min diarios de IHE son suficientes para incrementar la EPO endógena en sujetos muy entrenados, pero esta no se ve reflejada en una respuesta eritropoyética, lo

que demuestra que es poco probable que el rendimiento se incremente.

Del mismo modo, Frey, Zenhausern y Colmbani (2000) tampoco observaron cambios en las variables hematológicas después de 21 días de IHE, 75 min al día a 6400 m (9% FiO₂) en atletas moderadamente entrenados. Sin embargo, dos horas después de la primera sesión de IHE, observó un incremento significativo del 38% en la hormona eritropoyetina. Además, Villa et al. (2005) observan un incremento en la hormona eritropoyetina tras la aplicación de un programa en ciclistas a lo largo de la vuelta ciclista a España 2001, pero no observan modificaciones en el hematocrito, la hemoglobina o los eritrocitos.

Babcock y Kirby (2008) tampoco encuentran diferencias significativas en las variables hematológicas medidas en su estudio, observando un mantenimiento del número de eritrocitos y del hematocrito en ciclistas entrenados. Del mismo modo, Tadibi, Dehnert, Menold, y Bartsch (2007) tampoco encuentran diferencias entre el grupo hipoxia y control y entre los momentos previo y posterior al programa de IHE en las variables hemoglobina, hematocrito, EPO y eritrocitos. Estos resultados también son encontrados por Ramos et al. (2011), que observan un mantenimiento de las variables eritrocitos, reticulocitos, hemoglobina y EPO o por Hinckson, Hamlin, Wood y Hopkins (2007), que muestran un incremento no significativo del 2% en la hemoglobina, 0.9% en el hematocrito y 0.7% en los reticulocitos después de un programa de corta duración de IHE. En esta línea, son numerosos los estudios (Julian et al., 2004; Katayama, Matsuo, Ishida, Mori, & Miyamura, 2003; Katayama et al., 2004; Rodas, Parra, Sitja, Arteman, & Viscor, 2004; Hamlin & Hellemans, 2007; Marshall et al., 2008; Tan & Urquhart, 2010) que observan un mantenimiento de las variables hematológicas medidas (reticulocitos, hematocrito y hemoglobina).

Por otro lado, el estudio de Hellemans (1999) obtiene resultados que contradicen a los estudios de IHE expuestos con anterioridad. En este estudio se observa un incremento en la EPO junto a un incremento de la respuesta eritropoyética. Los estudios que realiza este autor utilizan un método que combina de forma alternativa 5 minutos de inhalación de aire con baja concentración de O₂ y 5 minutos respirando aire ambiental durante un total de 60 minutos. El protocolo tenía una duración de 20 días, los 10 primeros días el FiO₂ fue del 10% (5800 m), los últimos 10 días bajó hasta el 9% (6400 m). Los reticulocitos (29%), la hemoglobina (4%) y el hematocrito (5%) aumentaron de forma significativa.

Estos resultados son confirmados por Rodríguez, Ventura y Casas (2000), que observaron un aumento

significativo en el número de reticulocitos (180%), eritrocitos (7%), hemoglobina (13%) y hematocrito (6%), después de un programa de IHE con aumento progresivo de hipoxia hipobárica (4000-5500 m). La duración era de 90 minutos por sesión, con una frecuencia de tres veces en semana durante 3 semanas. Otro estudio de Rodríguez, Murio y Ventura (2003) obtiene los mismos resultados, observando un incremento en el número de eritrocitos y reticulocitos, en la hemoglobina y en el hematocrito. Este autor muestra que 90 minutos de exposición pasiva a hipoxia es suficiente para obtener cambios significativos en los parámetros hematológicos medidos. Desafortunadamente, este estudio no incluía en su diseño un grupo control, por lo que no podemos asegurar que los cambios producidos se deban al programa de hipoxia.

Bonetti, Hopkins, Lowe, Boussana y Kilding (2009) también observan un incremento significativo en la variable reticulocitos (14%) después de un programa de IHE, observando que estos aumentaban hasta el 40%, 2 semanas después de finalizar la exposición. Este aumento trae asociado un aumento del 2.9% en la hemoglobina. En un estudio previo de estos autores (Bonetti, Hopkins, & Kilding, 2006) también se observó un aumento significativo de la hemoglobina (3.6%).

En estudios con deportes colectivos también se han observado un aumento significativo en la hemoglobina y el hematocrito (Wood, Dowson, & Hopkins, 2006) después de un programa de IHE. Estos resultados no concuerdan con los encontrados por Dobson (2009) en jugadores de baloncesto semiprofesionales, que observó un mantenimiento en todas las variables hematológicas medidas (hemoglobina, reticulocitos y hematocrito).

La ferritina es la principal proteína almacenadora de hierro en los vertebrados y que por lo tanto influye en la efectividad del proceso de la eritropoyesis y también ha sido una variable de interés en los estudios de hipoxia intermitente. Al igual que sucede con otros parámetros, existe una diversidad de resultados en función del protocolo utilizado. Encontramos estudios que observan un incremento del 10.5% en la concentración de esta proteína (Hinckson, Hamlin, Wood, & Hopkins, 2007), estudios que no observan modificaciones en dicha variable (Babcock & Kirby, 2008; Dobson, 2009; Hamlin & Hellemans, 2007; Ramos et al., 2011) o estudios que observan un descenso significativo (-15%) pese al incremento de la eritropoyesis (Bonetti et al., 2006; Bonetti, Hopkins, Lowe, Boussana, & Kilding, 2009).

Esta divergencia de resultados en los cambios hematológicos pueden venir derivada de las diferencias en los protocolos de obtención y análisis de la sangre,

los cuales no son universales, así como de los protocolos de exposición a hipoxia intermitente utilizados (Dobson, 2009).

Adaptaciones hematológicas al IHT

La utilización de la estrategia IHT en deportistas y la respuesta de la eritropoyesis ante estos programas ha sido estudiada en los últimos años por diferentes autores, encontrando en la literatura estudios contradictorios.

Por un lado, encontramos el estudio de Meeuwssen, Hendriksen y Holewijn (2001), en el que se observa un incremento del hematocrito y la hemoglobina tras un programa de IHT de 10 días de duración de forma consecutiva. La muestra de este estudio estaba formada por ocho triatletas que realizaban 2 horas de ciclismo al día a 2500 m de altitud manteniendo unos valores del 60-70% de su frecuencia cardiaca de reserva. Los resultados medidos dos días después de la finalización del programa mostraron un incremento del hematocrito ($43 \pm 2\%$ a $48 \pm 2\%$) y hemoglobina (12.17 ± 0.27 a 13.6 ± 0.19 g/dl). Los valores regresaban a los basales 9 días después de la finalización del programa. El incremento encontrado no se puede relacionar con una deshidratación, ya que no se encontraron cambios en el volumen plasmático. Por otro lado, la carga de entrenamiento durante el programa puede jugar un rol fundamental en los cambios hematológicos observados (Millet et al., 2010).

Recientemente, Hamlin, Marshall, Hellemans, Ainslie, y Anglem (2010) obtienen resultados similares, observando un incremento significativo del 1.5% en la hemoglobina, 2.4% en el hematocrito y 2.1% en el número de reticulocitos, en una muestra de 16 deportistas tras un programa de 10 días y 90 min al día de duración. En otro estudio (Holewijn & Meeuwssen, 1996) también se observó un incremento en la concentración de eritropoyetina después de 5 días consecutivos de entrenamiento en hipoxia (3 horas al día) pero su muestra era muy escasa ($n = 4$).

Por el contrario, también encontramos estudios realizados con programas de IHT en los que no se observan cambios hematológicos. Estudios con protocolos de 3 sesiones a la semana de 45-60 minutos de duración a 2500-4000 m durante 3-5 semanas no encuentran cambios en el hematocrito o la hemoglobina (Emonson, Aminuddin, Wight, Scroop, & Gore, 1997; Truijens, Toussaint, Dow, & Levine, 2003; Vallier, Chateau, & Guezeenec, 1996). Estos resultados concuerdan con otros en los que se concluye que 1 hora diaria en condiciones de hipoxia es insuficiente para producir cambios hematológicos (Engfred et al., 1994; Levine &

Stray-Gundersen, 1992). Sin embargo, Terrados, Melichna, Sylven y Jansson (1988) aplicaron un protocolo de 2 horas de duración a 2300 metros durante 4-5 veces a la semana y 4 semanas y tampoco se observaron modificaciones en los parámetros sanguíneos.

Recientemente, Czuba et al. (2011) no encuentran diferencias en las variables hematológicas (eritrocitos, hemoglobina y hematocrito) tras un programa de IHT de 3 semanas de duración en ciclistas. Estos resultados concuerdan con el estudio realizado por Vallier et al. (1996), que aplica un protocolo de 3 días a la semana durante 3 semanas de altitud hipobárica simulada de 4000 m. Las sesiones de entrenamiento consistían en 60 minutos de trabajo al 66% de la potencia máxima e intervalos al 85% de la potencia máxima. Siete días después de finalizar el programa no se encontraron diferencias significativas en las variables sanguíneas analizadas en el grupo de triatletas. En la línea con los resultados de estos estudios se encuentran los obtenidos por Geiser, Vogt y Billeter (2001) o Morton y Cable (2005), que observaron un mantenimiento en la hemoglobina, los reticulocitos y los eritrocitos tras la finalización del programa de entrenamiento en hipoxia intermitente.

También existen estudios que combinan los programas de IHT suplementándolos con programas de IHE. Rodríguez, Casas y Casas (1999) examinaron los efectos de combinar un programa de IHE e IHT en 17 alpinistas. El programa de IHE constaba de un protocolo de 3-5 horas al día durante 9 días en altitudes que incrementaban progresivamente desde los 4000 a los 5500 m. Además, los sujetos realizaban de 3 a 5 sesiones de entrenamiento a la semana de 30-75 minutos de duración a baja intensidad. Los autores observaron un incremento significativo en los reticulocitos (54%), eritrocitos (12%), hemoglobina (18%) y hematocrito (11%).

Además, Casas, Casas, y Pagés (2000) utilizando el mismo protocolo que el estudio anterior, pero con una duración de 17 días, encontraron diferencias significativas, con un incremento en los eritrocitos (4.61 a $4.97 \times 10^6 / \mu\text{l}$) y hemoglobina (14.8 a 16.4 g/dl). Los autores de estos estudios sugieren que la utilización de hipoxia de corta duración con entrenamiento a baja intensidad puede inducir una mejora en la capacidad de transportar oxígeno en la sangre. En vista de los resultados de los estudios mencionados, la utilización de IHT puede producir efectos positivos en los parámetros hematológicos, si bien combinando este tipo de programas con otros de IHE se observa una mayor eficacia en la mejora de la capacidad de transportar O_2 .

Por otro lado, los cambios en las variables hematológicas pueden deberse a causas ajenas al tratamiento de

hipoxia. La dieta y la actividad física modifican los valores sanguíneos. Por ejemplo, la influencia del hierro ingerido en la dieta produce efectos sobre la hemoglobina y el hematocrito. Este aspecto se ha analizado en la literatura, donde algunos estudios proporcionan hierro oral a los sujetos (Julian et al., 2004; Wood, Dowson, & Hopkins, 2006), mientras que otros sólo se lo proporcionan a los sujetos con niveles de hierro bajo (Bonetti et al., 2006; Bonetti et al., 2009; Hamlin & Hellemans, 2007; Hinckson, Hopkins, Downey, & Smith, 2006) o por el contrario, estudios que no aportan suplementación de hierro (Babcock & Kirby, 2008; Hinckson et al., 2007; Tadibi et al., 2007). Del mismo modo, la actividad física realizada produce una modificación en la variable reticulocitos, independientemente de la dosis de hipoxia expuesta al sujeto (Schmidt, Eckardt, Strauch, & Bauer, 1991), por lo que existe la posibilidad de que los cambios en las variables hematológicas se puedan ver modificados por la relación triangular establecida entre la dieta, la actividad física y el programa de hipoxia.

A continuación se expone una tabla resumen (tabla 1) donde se incluyen los estudios de la literatura que investigan los efectos sobre diferentes variables hematológicas de los programas de hipoxia intermitente.

Conclusiones

En conclusión, la literatura muestra que los métodos de entrenamiento en hipoxia intermitente parecen ser mucho más beneficiosos que los de exposición a hipoxia intermitente, si bien ambos pueden estimular parámetros hematológicos como la eritropoyetina, hematocrito, hematíes o hemoglobina, que demuestran una estimulación de la eritropoyesis del deportista y que derivan en un incremento del rendimiento aeróbico o anaeróbico del deportista por una mejor capacidad de transporte de oxígeno en la sangre.

Aplicaciones prácticas

Es común que los deportistas de alto nivel, especialmente de deportes de resistencia de larga duración, intenten optimizar al máximo su rendimiento incorporando a su rutina de entrenamientos diferentes métodos y medios que favorecen su recuperación o que le ayudan a mejorar su estado de forma.

Por lo tanto, la utilización de un protocolo determinado de hipoxia intermitente dependerá de la competición y del momento de la temporada en el que nos encontramos, siendo más adecuado el desarrollo de

Tabla 1: Resumen de los estudios que observan los efectos de la hipoxia intermitente sobre parámetros hematológicos.

Autor (Año)	Programa	Características sujetos	Protocolo	Resultados
Abellán et al. (2005)		16 triatletas	4 semanas/5 días/3 horas/4000-5500 m	+ EPO = hb, ret, transf, htc
Babcock y Kirby (2008)		18 ciclistas entrenados	15 sesiones/77-100% SpO ₂	= htc, ret, ferrit
Bonetti et al. (2006)		10 remeros	15 sesiones/60 min/5 min hip-5 norm/76-90% SpO ₂	+ hb y htc – ferrit
Bonetti y Hopkins (2009)		18 ciclistas y triatletas	15 sesiones/60 min/3-5 min hip-3-5 norm/76-90% SpO ₂	+ ret – ferrit
Burtscher et al. (2010)		11 corredores de 1/2 distancia	15 sesiones/2 horas/11-15% FiO ₂	+ htc y hb
Frey et al. (2000)		Sujetos entrenados	21 días/6400 m /75 min sesión.	+ EPO = htc, erit
Friedmann et al. (2005)		16 nadadores junior	3 semanas/4 horas/15% FiO ₂	+ EPO = hb, htc
Hamlin y Hellemans (2007)	IHE	22 atletas multideporte	15 sesiones/90min/5min hip-5 norm/13-11% FiO ₂	+ ret y htc – ferrit = hb
Hellemans (1999)		10 atletas de resistencia	18 sesiones/1 hora/2 veces al día/10-9 % FiO ₂	+ hb, htc, ret, erit
Hinckson et al. (2007)		10 jugadores de rugby	14 sesiones/60 min/6 min hip-4 norm/76-100% SpO ₂	+ ferrit = hb, ret y htc
Julian et al. (2004)		14 atletas élite	20 sesiones/70 min/5 min hip-5 norm/12-10% FiO ₂	= hb, htc, EPO y transf
Katayama et al. (2003)		12 atletas	9 sesiones/90 min/4500 m	= ferritina, hb, ret, erit y htc
Katayama et al. (2004)		15 atletas	14 sesiones/3 horas /12.3% FiO ₂	= hb, ret, EPO
Lundby et al. (2005)		8 deportistas entrenados	14 sesiones/2 horas/4100 m	= ret, transf
Marshall et al. (2008)		5 ciclistas+3 triatletas	10 días/90 min/7 min hip+3 min norm/80% SpO ₂	= hb, ferrit, erit, htc
Ramos et al. (2011)		16 ciclistas élite	32 sesiones/60 min/5 min hip-5 min norm/88-75% SpO ₂	= EPO, hb, ferrit, erit – htc
Rodas et al. (2004)		4 triatletas profesionales	12 sesiones/180 min/4000-5500 m	= ret, hb, htc
Rodríguez et al. (2000)		13 deportistas	3 semanas/3 veces semana/3 horas/5500 m	+ erit, htc, ret, hb, EPO
Rodríguez et al. (2003)		16 nadadores alto nivel	14 sesiones/180 min/4000-5500 m	+ erit, ret, hb y htc
Saunders et al. (2004)		22 atletas de resistencia	20 sesiones/9-12 horas/2000-3100 m	= hb
Tadibi et al. (2007)		20 atletas de resistencia	15 sesiones/60 min/6 min hip-4 norm/10-11% FiO ₂	= htc, EPO, erit
Tan y Urquhart (2010)		2 nadadoras olímpicas	15 días/60 min/6 min hip-4 norm/75-90% SpO ₂	= erit, hb, htc
Villa et al. (2005)		11 ciclistas profesionales	1 semana/20 min/5 min hip-5 norm/12.6% FiO ₂	+ EPO = ret, erit, hb, ferrit
Wood et al. (2006)	29 jugadores de hockey y fútbol	15 sesiones/60 min/6 min hip-4 norm/77-100% SpO ₂	+ hb, htc y Leuc	
Neya et al. (2007)	IHE-IHT	25 corredores de 1/2 distancia	12 sesiones/30 minutos/3000 m	= hb
Casas et al. (2000)		6 alpinistas	17 días /3-5 horas al día/4000-5500 m	+ erit y hb
Czuba et al. (2011)		20 ciclistas élite	3 semanas /3 sesiones por semana/60 min sesión/15.2% FiO ₂	= erit, hb, htc
Geiser et al. (2001)		33 desentrenados	6 semanas/5 días por semana/30 min/3850 m	= hb, ferrit, ret, erit
Hamlin et al. (2010)		16 deportistas entrenados	10 días/90 minutos/88-82% SpO ₂	+ hb, htc, ret – transf y fe
Meeuwse et al. (2001)	IHT	16 triatletas	10 sesiones/2 horas /2500 m	+ hb, htc
Morton y Cable (2005)		16 jugadores de deportes colectivos	4 semanas/3 veces semana/30 min/15% FiO ₂	= hb, htc
Roels et al. (2005)		33 ciclistas y triatletas	14 sesiones/PiO ₂ = 100-160 mmHg	= htc y hb
Terrados et al. (1988)		8 ciclistas	4-5 veces semana durante 4 semanas	= htc y hb
Truijens et al. (2003)		16 nadadores	5 semanas /3 sesiones/semana/15.2% FiO ₂	= htc y hb
Vallier et al., (1996)		5 triatletas	3 semanas /3 sesiones/semana/4000m	= EPO, erit, hb

(hip = hipoxia; norm = normoxia; SpO₂ = saturación de oxígeno; FiO₂ = fracción de oxígeno inspirado; ret = reticulocitos, hb = hemoglobina; erit = eritrocitos, ferrit = ferritina, fe = hierro, transf = transferrina, leuc = leucocitos, htc = hematocrito, EPO = eritropoyetina; + mejora; = se mantiene; - disminuye)

unos contenidos u otros. En líneas generales, utilizaremos un programa de IHT en la fase precompetitiva y competitiva del macrociclo, combinándolo con el método IHE. Recientes estudios (Lancaster & Smart, 2012) demuestran que los mejores efectos se consiguen con altitudes de 2500-3500 m aplicados con programas de IHE durante 9.5 horas al día por un periodo de 2 semanas o con protocolos de una duración de más de 28 días a 2000-2500 m de altura durante 20 horas (Duke, Chapman, & Levine, 2012).

Se recomienda una duración del programa de al menos 5 semanas, utilizando una frecuencia semanal de 2 a 3 sesiones de IHT a la semana, complementarias al entrenamiento habitual. La duración de estas sesiones oscilará entre los 60-90 minutos, pudiendo llegar a las 2 horas. La altitud simulada durante la sesión oscilará entre los 2500-3000 m o un 14,5-15% de FiO₂. El programa de IHT se complementa con 3-5 sesiones a la semana de IHE de 90-180 minutos de duración a una altitud de unos 3000 m (Millet, Woorons, & Roels,

2009). Estas adaptaciones pueden perdurar en el tiempo durante 3 o 4 semanas (Vogt & Hoppeler, 2010).

Otro de los parámetros a tener en cuenta es la intensidad de la sesión de IHT, la cual debe de estar próxima al umbral anaeróbico del deportista, medido en condiciones de hipoxia a cada una de las alturas que vayamos a simular. Este programa debe de contemplarse en la planificación de la temporada, secuencializando y distribuyendo de forma correcta las cargas en función del objetivo del mesociclo y del microciclo en el que nos encontremos. Además, debemos de cuantificar la carga de estas sesiones, para determinar el impacto del entrenamiento sobre el deportista y no producir sobrecargas o síndrome de sobreentrenamiento, junto con un descenso de los valores hematológicos que pueden derivar en una anemia ferropénica.

Futuras líneas de investigación

Tras la revisión bibliográfica llevada a cabo observamos que este campo de investigación tiene numerosas preguntas a las que responder y hacia las cuales se orientarán las investigaciones los próximos años. En primer lugar, la literatura es muy abundante en deportes de resistencia, sin embargo es muy escasa la

bibliografía que trata de estudiar el efecto de un programa de hipoxia intermitente en poblaciones donde la potencia láctica y aláctica es un factor limitante del rendimiento, o en deportes de carácter colectivo.

Por otro lado, el campo de las adaptaciones celulares y moleculares como respuesta a la hipoxia se ha desarrollado en los últimos años gracias a la aparición de la tecnología analítica necesaria. Como resultado, se ha logrado entender los procesos que ocurren a nivel celular durante y después de exponer a nuestro organismo a hipoxia, fundamentalmente por el estudio del Factor Inducible por Hipoxia-1 (HIF-1), el cual actúa como el regulador principal en la expresión de los diferentes genes regulados por el oxígeno. Sin embargo, será la evolución de la investigación y del conocimiento lo que nos irá permitiendo conocer más en profundidad todas las funciones del HIF-1 y por tanto comprobar los efectos de un programa de entrenamiento o exposición a hipoxia intermitente sobre el factor inducible por hipoxia (HIF1).

Por último, existe un nuevo campo de aplicación de estos programas en la utilización como terapia complementaria de estos métodos de entrenamiento en diferentes patologías. Por lo tanto, la investigación se orientara para comprobar la eficacia de los programas de hipoxia intermitente como terapia complementaria en patologías respiratorias, metabólicas o cardiorrespiratorias.

BIBLIOGRAFÍA

- Abellán, R., Remacha, A. F., Ventura, R., Sarda, M. P., Segura, J. & Rodríguez, F. A. (2005). Hematologic response to four weeks of intermittent hypobaric hypoxia in highly trained athletes. *Haematologica*, 90(1), 126-127.
- Babcock, C. J. & Kirby, T. E. (2008). The effect of intermittent simulated altitude exposure via re-breathing on cycling performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 40(5), s51.
- Bonetti, D. L. & Hopkins, W. G. (2009). Sea-level exercise performance following adaptation to hypoxia: a meta-analysis. *Sports Medicine*, 39(2), 107-127.
- Bonetti, D. L., Hopkins, W. G. & Kilding, A. E. (2006). High-intensity kayak performance after adaptation to intermittent hypoxia. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 1(3), 246-260.
- Bonetti, D. L., Hopkins, W. G., Lowe, T. E., Boussana, A. & Kilding, A. E. (2009). Cycling performance following adaptation to two protocols of acutely intermittent hypoxia. *International Journal of Sports Physiology Performance*, 4(1), 68-83.
- Burtscher, M., Gatterer, H., Faulhaber, M., Gerstgrasser, W. & Schenk, K. (2010). Effects of intermittent hypoxia on running economy. *International Journal of Sports Medicine*, 31(9), 644-650.
- Casas, M., Casas, H. & Pagés, T. (2000). Intermittent hypobaric hypoxia induces altitude acclimatization and improves the lactate threshold. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 71(2), 125-130.
- Cerretelli, P. y Samaja, M. (2003). Acid-base balance at exercise in normoxia and in chronic hypoxia. Revisiting the lactate paradox. *European Journal of Applied Physiology*, 90(4), 431-448.
- Czuba, M., Waskiewicz, Z., Zajac, A., Poprzecki, S., Cholewa, J. & Rocznio, R. (2011). The effects of intermittent hypoxic training on aerobic capacity and endurance performance in cyclists. *Journal of Sports Science and Medicine*, 10(2), 175-183.
- Dobson, B. (2009). The effect of intermittent simulated-altitude training on physical performance in trained basketball players. Auckland: Auckland University.
- Duke, J., Chapman, R. & Levine, B. (2012). Live-high train-low altitude training on maximal oxygen consumption in athletes: A systematic review and meta-analysis. *International Journal of Sports Science and Coaching*, 7(1), 15-20.
- Eckardt, K. & Bauer, C. (1989). Erythropoietin in health and disease. *European Journal of Clinical Investigation*, 19(1), 117-127.
- Eckardt, K., Boutellier, U., Kurtz, A., Schopen, M., Koller, E. & Bauer, C. (1989). Rate of erythropoietin in humans in response to acute hypobaric hypoxia. *Journal Applied of Physiology*, 66(4), 1785-1788.
- Emonson, D. L., Aminuddin, A. H., Wight, R. L., Scroop, G. C. & Gore, C. J. (1997). Training-induced increases in sea level VO₂max and endurance are not enhanced by acute hypobaric exposure. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 76(1), 8-12.
- Engfred, K., Kjaer, M., Secher, N. H., Friedman, D. B., Hanel, B. & Nielsen, O. J. (1994). Hypoxia and training-induced adaptation of hormonal responses to exercise in humans. *European Journal Applied Physiology and Occupational Physiology*, 68(4), 303-309.
- Frey, W. O., Zenhausern, R. & Colmbani, P. C. (2000). Influence of intermittent exposure to normobaric hypoxia on hematological indexes and exercise performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise, Suppl* 32(5), s65.
- Friedmann, B., Frese, F., Menold, E., Kauper, F., Jost, J. & Bartsch, P. (2005). Individual variation in the erythropoietic response to altitude training in elite junior swimmers. *British Journal of Sports Medicine*, 39(3), 148-153.
- Geiser, J., Vogt, M. & Billeter, R. (2001). Training high-living low: changes of aerobic performance and muscle structure with training at simulated altitude. *International Journal of Sports Medicine*, 22, 579-585.
- Hamlin, M. J., & Hellemans, J. (2007). Effect of intermittent normobaric hypoxic exposure at rest on haematological, physiological, and perfor-

- mance parameters in multi-sport athletes. *Journal of Sports Science*, 25(4), 431-441.
- Hamlin, M. J., Marshall, H. C., Hellemans, J., Ainslie, P. N. & Anglem, N. (2010). Effect of intermittent hypoxic training on 20 km time trial and 30 s anaerobic performance. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 20(4), 651-661.
- Hellemans, J. (1999). Intermittent hypoxic training: a pilot study. *Proceedings of the Second Annual International Altitude Training Symposium*, 18(1), 145-154.
- Hinckson, E. A., Hamlin, M. J., Wood, M. R. & Hopkins, W. G. (2007). Game performance and intermittent hypoxic training. *British Journal of Sports Medicine*, 41(8), 537-539.
- Holewijn, M. & Meeuwse, T. (1996). *High-altitude training in a hypobaric room: haematological changes*. Soesterberg: NLRGC Rapport.
- Hoppeler, H. & Vogt, M. (2001). Muscle tissue adaptations to hypoxia. *The Journal of Experimental Biology*, 204(18), 3133-3139.
- Jedlickova, K., Stockton, D. W., Chen, H., Stray-Gundersen, J., Witkowski, S. & Ri-Li, G. (2003). Search for genetic determinants of individual variability of the erythropoietin response to high altitude. *Blood Cells, Molecules and Diseases*, 31(2), 175-182.
- Julian, C. G., Gore, C. J., Wilber, R. L., Daniels, J. T., Fredericsson, M. & Stray-Gundersen, J. (2004). Intermittent normobaric hypoxia does not alter performance or erythropoietic markers in highly trained distance runners. *Journal of Applied Physiology*, 96(6), 1800-1807.
- Katayama, K., Matsuo, H., Ishida, K., Mori, S. & Miyamura, M. (2003). Intermittent hypoxia improves endurance performance and submaximal exercise efficiency. *High Altitude Medicine & Biology*, 4(3), 291-304.
- Katayama, K., Sato, K., Matsuo, H., Ishida, K., Iwasaki, K. & Miyamura, M. (2004). Effect of intermittent hypoxia on oxygen uptake during submaximal exercise in endurance athletes. *European Journal of Applied Physiology*, 92(1-2), 75-83.
- Klaursen, K., Robinson, S. & Micahel, E. D. (1996). Effect of high altitude on maximal working capacity. *Journal of Applied Physiology*, 21(4), 1191-1194.
- Knaupp, W., Khilnani, S., Sherwood, J., Schraf, S. & Steinberg, H. (1992). Erythropoietin response to acute normobaric hypoxia in humans. *Journal of Applied Physiology* 73(3), 837-840.
- Lancaster, K. & Smart, N. (2012). Live-high train-low altitude training on maximal oxygen consumption in athletes. A systematic review and meta-analysis. *International Journal of Sports Science & Coaching*, 7(1), 1-13.
- Levine, B. & Stray-Gundersen, J. (1992). A practical approach to altitude training: where to live and train for optimal performance enhancement. *International Journal of Sports Medicine, Suppl.1*, 209-212.
- Levine, B. D. (1997). Effect of high-altitude exposure in the elderly: the tenth mountain division study. *Circulation*, 96 (4), 1224-1232.
- Levine, B. D. & Stray-Gundersen, J. (2005). Point: Positive effects of intermittent hypoxia (live high:train low) on exercise performance are mediated primarily by augmented red cell volume. *Journal of Applied Physiology*, 99(5), 2053-2055.
- Lundby, C., Nielsen, T. & Dela, F. (2005). The influence of intermittent altitude exposure to 4100 m on exertion and blood capacity and blood variables. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 15(1), 182-187.
- Marshall, H. C., Hamlin, M. J., Hellemans, J., Murrell, C., Beattie, N. & Hellemans, I. (2008). Effects of intermittent hypoxia on SaO₂, cerebral and muscle oxygenation during maximal exercise in athletes with exercise-induced hypoxemia. *European Journal of Applied Physiology*, 104(2), 383-393.
- Maxwell, A. P., Lappin, T. R., Johnston, C. F., Bridges, J. M. & McGeown, M. G. (1990). Erythropoietin production in kidney tubular cells. *British Journal of Haematology*, 74(4), 535-539.
- Meeuwse, T., Hendriksen, I. J. & Holewijn, M. (2001). Training-induced increases in sea-level performance are enhanced by acute intermittent hypobaric hypoxia. *European Journal of Applied Physiology*, 84(4), 283-290.
- Millet, G. P., Faiss, R., Pialoux, V., Mounier, R. & Brugniaux, J. V. (2012). Point: Counterpoint "hypobaric hypoxia induces / does not induce different responses than normobaric hypoxia". *Journal of Applied Physiology*, 112 (10), 1783-1784.
- Millet, G. P., Roels, B., Schmitt, L., Woorons, X. & Richalet, J. P. (2010). Combining hypoxic methods for peak performance. *Sports Medicine*, 40(1), 1-25.
- Millet, G. P., Woorons, X. & Roels, B. (2009). Effects of intermittent hypoxia training on peak performance in elite athletes. In L. Xi & S. Serebrovskaya (Eds.), *Intermittent hypoxia* (pp. 459-471). New York: Nova Science.
- Morton, J. P. & Cable, N. T. (2005). Effects of intermittent hypoxic training on aerobic and anaerobic performance. *Ergonomics*, 48(11), 1535-1546.
- Neya, M., Enoki, T., Kumai, Y., Sugoh, T. & Kawahara, T. (2007). The effects of nightly normobaric hypoxia and high intensity training under intermittent normobaric hypoxia on running economy and hemoglobin mass. *Journal of Applied Physiology*, 103(3), 828-834.
- Ramos, D. J., Martínez, F., Esteban, P., Rubio, J., Mendizábal, S. & Jiménez, J. F. (2011). Modificaciones hematológicas producidas por un programa de exposición a hipoxia intermitente de ocho semanas de duración en ciclistas. *Archivos de Medicina del Deporte*, 28(145), 257-264.
- Rodas, G., Parra, J., Sitja, J., Arteman, J. & Viscor, G. (2004). Efecto de un programa combinado de entrenamiento físico e hipoxia hipobárica intermitente en la mejora del rendimiento físico de triatletas de alto nivel. *Apunts: Medicina de l'Esport*, 144(1), 5-10.
- Rodríguez, F. A., Casas, H. & Casas, M. (1999). Intermittent hypobaric hypoxia stimulates erythropoiesis and improves aerobic capacity. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 31, 264-268.
- Rodríguez, F. A., Murio, J. & Ventura, J. L. (2003). Effects of intermittent hypobaric hypoxia and altitude training on physiological and performance parameters in swimmers. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 35(1), 115.
- Rodríguez, F. A., Ventura, J. L. & Casas, M. (2000). Erythropoietin acute reaction and haematological adaptations to short, intermittent hypobaric hypoxia. *European Journal of Applied Physiology*, 82(3), 170-177.
- Roels, B., Millet, G. P., Marcoux, C. J., Coste, O., Bentley, D. J. & Candau, R. B. (2005). Effects of hypoxic interval training on cycling performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 37(1), 138-146.
- Saunders, P. U., Telford, R. D., Pyne, D. B., Cunningham, R. B., Gore, C. J. & Hahn, A. G. (2004). Improved running economy in elite runners after 20 days of simulated moderate-altitude exposure. *Journal of Applied Physiology*, 96 (5), 931-937.
- Schmidt, W., Eckardt, K., Strauch, S. & Bauer, C. (1991). Effects of maximal and submaximal exercise under normoxic and hypoxic conditions on serum erythropoietin level. *International Journal of Sports Medicine*, 12 (2), 457-461.
- Stray-Gundersen, J., Chapman, R. & Levine, B. (2001). "Living high-training low" altitude training improves sea level performance in male and female elite runners. *Journal of Applied Physiology*, 91(5), 1113-1120.
- Tadibi, V., Dehnert, C., Menold, E., & Bartsch, P. (2007). Unchanged anaerobic and aerobic performance after short-term intermittent hypoxia. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 39(5), 858-864.
- Tan, A. & Urquhart, G. (2010). Changes in haematological indices and swimming performance after intermittent normobaric hypoxia exposure. *British Journal of Sports Medicine*, 44(4s1), 14.
- Terrados, N., Melichna, J., Sylven, C. & Jansson, E. (1988). Effects of training at simulated altitude on performance and muscle metabolic capacity in competitive road cyclists. *European Journal of Applied Physiology*, 57(1), 203-209.
- Truijens, M. J., Toussaint, H. M., Dow, J. & Levine, B. D. (2003). Effect of high-intensity hypoxic training on sea-level swimming performances. *Journal of Applied Physiology*, 94(2), 733-743.
- Vallier, J. M., Chateau, P. & Guezennec, C. Y. (1996). Effects of physical training in a hypobaric chamber on the physical performance of competitive triathletes. *European Journal of Applied Physiology*, 21(1), 73-80.
- Villa, J. G., Lucía, A., Marroyo, J. A., Avila, C., Jiménez, F. & García-López, J. (2005). Does intermittent hypoxia increase erythropoiesis in professional cyclists during a 3-week race? *Canadian Journal of Applied Physiology*, 30(1), 61-73.
- Vogt, M. & Hoppeler, H. (2010). Is hypoxia training good for muscles and exercise performance? *Progress Cardiovascular Diseases*, 52(6), 525-533.
- Wood, M. R., Dowson, M. N. & Hopkins, W. G. (2006). Running performance after adaptation to acutely intermittent hypoxia. *European Journal of Applied Physiology*, 6(3), 163-172.