

Estudio de la variabilidad de la frecuencia cardiaca tras la exposición a la hipoxia normobárica

Inés Albertus Cámara, María José Paredes Ruiz, María Jódar Reverte, Vicente Ferrer López, Ignacio Martínez González-Moro

Grupo de Investigación Ejercicio Físico y Rendimiento Humano. Campus Mare Nostrum. Universidad de Murcia.

doi: 10.18176/archmeddeporte.00095

Recibido: 20/01/2022
Aceptado: 21/07/2022

Resumen

La variabilidad de la frecuencia cardiaca (VFC) es una herramienta capaz de analizar y valorar la actividad vegetativa sobre el corazón ante diversas actividades y situaciones. Consiste en medir el tiempo que transcurre entre cada dos latidos cardiacos durante un periodo de tiempo y expresarlo en función de ecuaciones matemáticas y estadísticas. Otros autores han analizado la influencia de diferentes estresores sobre la VFC. En este trabajo buscamos la acción de la hipoxia normobárica (HN) sobre la misma. La HN consiste en respirar aire empobrecido de oxígeno simulando el entrenamiento en altitud. El objetivo del estudio es determinar la influencia de la HN sobre los dominios de tiempo y frecuencia de la VFC. Sometimos a 13 sujetos sanos (deportistas recreacionales) a dos sesiones de HN. Usamos el simulador iAltitude Trainer v2.7°. La primera mediante un test de tolerancia a la hipoxia (TTH) (10 minutos, 11% O₂, equivalente a 5.050 m) y, la segunda, con una exposición intermitente (HNI) (14% O₂, 3.250 m) en la que se alternaron periodos de 4 minutos de hipoxia con 4 de normoxia durante 64 minutos. Para el análisis de VFC se utilizó un pulsómetro Polar H10®, la aplicación HRV-elite® y el software Kubios-Standard®. Se tomaron los datos de los 5 minutos previos y posteriores a cada sesión, comparándose estos valores mediante el test de T-student para datos pareados. Ninguna de las variables de los dominios de tiempo (RRmedio, SDNN, rMSSD, pNN50) ni de frecuencia (VLF, LF, HF, LF/HF) de la VFC mostró cambios significativos ante ninguna de las dos situaciones. La HN no provocó modificaciones en los niveles de estrés de estos sujetos, siendo bien tolerada, clínica y electrocardiográficamente. Un test de tolerancia y una sesión de exposición a hipoxia normobárica intermitente no son estímulos suficientes para provocar cambios agudos en la VFC.

Palabras clave:

Variabilidad de la frecuencia cardiaca. Hipoxia normobárica intermitente. Tolerancia a la hipoxia.

Key words:

Heart rate variability. Intermittent normobaric hypoxia. Hypoxia tolerance.

Study of heart rate variability after exposure to normobaric hypoxia

Summary

Heart rate variability (HRV) is a tool capable of analysing and assessing the vegetative activity of the heart in various activities and situations. It consists of measuring the time that elapses between every two heartbeats over a period of time and expressing it in terms of mathematical and statistical equations. Other authors have analysed the influence of different stressors on HRV. In this work we are looking for the action of normobaric hypoxia (NH) on HRV. NH consists of breathing oxygen-depleted air simulating altitude training. The aim of the study is to determine the influence of HN on the time and frequency domains of HRV. We subjected 13 healthy subjects (recreational athletes) to two HN sessions. We used the iAltitude Trainer v2.7° simulator. The first was a hypoxia tolerance test (HTT) (10 minutes, 11% O₂, equivalent to 5050m) and the second was an intermittent exposure (HNI) (14% O₂, 3250m) in which periods of 4 minutes of hypoxia alternated with 4 minutes of normoxia for 64 minutes. For HRV analysis, a Polar H10® heart rate monitor, the HRV-elite® application and the Kubios-Standard® software were used. Data were taken 5 minutes before and after each session, and these values were compared using the Student's t- test for paired data. None of the variables in the time (RRmean, SDNN, rMSSD, pNN50) or frequency (VLF, LF, HF, LF/HF) domains of HRV showed significant changes in either situation. HN did not cause changes in the stress levels of these subjects and was well tolerated, clinically and electrocardiographically. A tolerance test and a session of exposure to intermittent normobaric hypoxia are not sufficient stimuli to cause acute changes in HRV.

Correspondencia: Inés Albertus Cámara
E-mail: ines.albertusc@gmail.com

Introducción

La variabilidad de la frecuencia cardiaca (VFC) (HRV, *Heart Rate Variability*), se ha definido como la variación de los intervalos de tiempo entre latido y latido cardiaco, conocidos como intervalos R-R¹. La VFC se puede evaluar mediante métodos lineales, analizados a través de los dominios de tiempo y de frecuencia, y métodos no lineales^{2,3}. En el dominio de tiempo se destacan los índices estadísticos: RRmedio (media de los intervalos RR); SDNN (desviación estándar de los intervalos RR); rMSSD (raíz cuadrada del valor medio de la suma de las diferencias al cuadrado de todos los intervalos RR sucesivos), pNN50 (porcentaje total de las diferencias entre los intervalos R-R adyacentes, mayores de 50 ms) y, en el dominio de frecuencia: VLF (muy baja frecuencia); HF (alta frecuencia); LF (baja frecuencia); LF/HF (cociente de baja frecuencia entre alta frecuencia)^{4,6}.

Tradicionalmente, la VFC ha sido utilizada en el ámbito del deporte, con la finalidad, entre otras, de mejorar la adaptación o el rendimiento de los atletas⁷. Además del deporte, tiene otras utilidades en el campo de la medicina, pues ha sido utilizada en distintas patologías como la cardiaca⁸, la depresión ansiosa⁹ y, actualmente, en la enfermedad COVID-19 como posible marcador de inflamación aguda¹⁰ o como método para detectar los efectos que desencadenó el confinamiento sobre esta variable¹¹.

Múltiples y variados factores pueden influir sobre la frecuencia cardiaca y, por ende, en el análisis de la variabilidad de la frecuencia cardiaca. Estos factores pueden dividirse en intrínsecos o extrínsecos al organismo. En relación con los primeros se establecen: la edad (la FC disminuye con la edad)¹², el sexo (en general, la FC es mayor en las mujeres)¹³, la posición del cuerpo (la FC es menor en posición supina)¹⁴ o el estrés laboral¹⁵. En relación con los factores extrínsecos se destacan: la humedad¹⁶, la hora del día a la que se realice la medición (la FC es más alta en las primeras horas de la mañana)¹⁴, la temperatura ambiental¹⁷ o la ingesta de sustancias como la cafeína^{18,19}. Un estímulo sobre el que se ha investigado poco es sobre la influencia de la hipoxia normobárica (respirar un aire con una proporción de oxígeno disminuido a una presión atmosférica constante) en la VFC.

Con el aumento de la altitud, la presión barométrica disminuye exponencialmente, lo que da lugar a una reducción progresiva de la presión parcial del oxígeno (pO₂) del ambiente, denominándose a este tipo hipoxia hipobárica²⁰. Sin embargo, con el avance de la tecnología se han desarrollado simuladores de altitud que permiten reducir la proporción de oxígeno en el aire sin cambiar la presión atmosférica, dando lugar a la llamada hipoxia normobárica (HN)²¹.

Entrenar en zonas donde el porcentaje de oxígeno esté disminuido ha sido un recurso de especial relevancia en el ámbito del deporte. Puede suponer un estímulo para nuestro organismo, mejorando los sistemas de adaptación a la hipoxia y, en consecuencia, actuando como un mecanismo de supercompensación²².

Según el tiempo de exposición a la hipoxia podemos diferenciar la exposición crónica, aquella que se realiza durante largos periodos de tiempo o la aguda y, dentro de esta última, la hipoxia normobárica intermitente (HNI) que consiste en aplicar periodos de hipoxia seguidos de periodos de normoxia (proporción de oxígeno normal).

En este estudio nos planteamos conocer las variaciones que se producen en los dominios de la variabilidad de la frecuencia cardiaca después de la exposición a hipoxia normobárica.

Material y método

Esta investigación es un estudio prospectivo de intervención. Los participantes fueron seleccionados bajo un criterio no probabilístico por conveniencia. Cada uno de ellos firmó el consentimiento informado de forma previa a la toma de datos. En él, se exponían los objetivos del estudio, las condiciones en las que se realizarían las mediciones, la confidencialidad y seguridad de la información obtenida. Previamente, se contó con la aprobación del Comité de Ética de Investigación de la Universidad de Murcia. En todos los casos se cumplieron los requisitos exigibles por el Código de Ética de la Asociación Médica Mundial (Declaración de Helsinki) para experimentos con seres humanos.

Participantes

Trece sujetos conforman nuestro estudio (53,3% mujeres). La edad de los participantes estaba comprendida entre los 20 y los 29 años. No padecían ninguna enfermedad cardiaca o respiratoria previa.

Los criterios de inclusión fueron: 1) Expresar la voluntad de querer participar en el estudio habiendo comprendido los alcances del mismo, los riesgos y beneficios de la intervención, confirmando la voluntad de participar a través de la firma del consentimiento informado 2) Presentar una edad entre los 20 y 30 años. Se excluyeron a aquellos que tuvieran patologías que contraindicaran la realización de la prueba; la presencia de una temperatura corporal superior a 37 °C y/o un test de anticuerpos positivo. 3) Haber pasado la enfermedad COVID-19 y no tener en el momento actual una prueba PCR negativa o no concluir alguna de las dos pruebas de hipoxia por razones ajenas a la misma.

Instrumentos

Para el estudio antropométrico se registró la talla (SECA 213[®]) y el peso (In Body 120[®]). El perímetro de cintura y cadera se obtuvo con una cinta metálica flexible Holtain[®] y el nivel de hemoglobina en sangre a través del dispositivo Lux[®]. La tensión arterial y la auscultación se realizó con un fonendoscopio y esfigmomanómetro tradicionales (Littmann Clasic[®]).

El test de tolerancia y la sesión de entrenamiento se realizó con un simulador de hipoxia iAltitude Trainer v2.7[®] conectado a una mascarilla específica. Durante ambas pruebas, a todos los participantes se les monitorizó la oxigenación muscular mediante el dispositivo Humon Hex[®] en el recto anterior del muslo derecho, la saturación de oxígeno con un pulsioxímetro (Nonin[®]) en el lóbulo de la oreja izquierda y la variabilidad de la frecuencia cardiaca con un pulsómetro Polar H10[®].

Además, por las circunstancias especiales a causa de la COVID-19, se tomó la temperatura mediante el termómetro digital Yuwell[®] y el test de anticuerpos "2019-nCoV IgG/IgM[®]" se usó para descartar la presencia del virus SARS-CoV-2.

Procedimiento previo

Cada participante, después de firmar voluntariamente el consentimiento informado, se sometía a la medición de distintos parámetros antropométricos y, en segundo lugar, a una exploración médica para descartar cualquier alteración que contraindicara la realización de las pruebas. Los procedimientos previos y ambas pruebas de hipoxia se llevaron a cabo en el Laboratorio de Investigación Biosanitaria (LAIB) de la Universidad de Murcia. La temperatura de la sala fue siempre constante, de 25 °C.

Se comenzaba tomando la temperatura corporal, seguidamente se realizaba el test de anticuerpos, el nivel de hemoglobina y el estudio antropométrico. A continuación, el participante cumplimentaba un cuestionario sobre enfermedades y/o antecedentes familiares. Este era revisado por un facultativo a través de una entrevista directa.

En segundo lugar, se tomaba la tensión arterial en decúbito supino, se auscultaba y se realizaba un electrocardiograma en reposo (Figura 1).

Realización de las pruebas de hipoxia

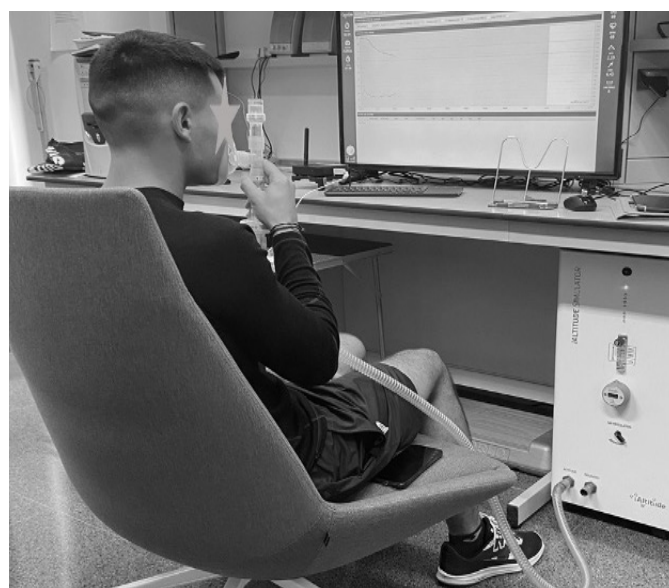
Comprobada la inexistencia de patologías que contraindicaran la prueba, el participante se sometía a respirar un aire empobrecido de oxígeno monitorizando de manera continua su variabilidad de la frecuencia cardiaca. Se comenzaba con un test de tolerancia para comprobar la adaptación de la persona a la hipoxia para, después, realizar una sesión de exposición a la misma. En ambas pruebas, si el simulador de hipoxia detectaba valores en la saturación arterial de oxígeno inferiores a un 83% indicaba, a través de señales visuales y auditivas, la retirada de la mascarilla, respirando así en condiciones normóxicas y recuperando la concentración de oxígeno normal.

Para ambas pruebas, el participante se sitúa en sedestación en un sillón, permitiéndole este el apoyo de cabeza y una flexión de cadera y rodilla de 90°. Se coloca una cuña de gomaespuma para el correcto apoyo lumbar, siendo una postura cómoda y relajada (Figura 2). El paciente lleva colocada una banda de pecho Polar H10®, vinculada a una tablet por conexión Bluetooth y, a través de la aplicación HRV elite®, se registraban los datos de la misma.

Figura 1. Exploración previa de un participante.



Figura 2. Un participante realizando una prueba de hipoxia.



Test de tolerancia a la hipoxia

En la posición anteriormente descrita, el paciente permanecía sentado y relajado 5 minutos antes de empezar el test de tolerancia para el registro de su VFC, en reposo y en normoxia.

Seguidamente, comenzaba el test de tolerancia. Consistía en respirar de manera ininterrumpida en condiciones hipóxicas (11% de oxígeno, equivalente a 5.050 m de altitud) durante un tiempo máximo de 10 minutos. Después de concluir el test, el sujeto seguía permaneciendo sentado para registrar los 5 minutos posteriores a la finalización del test de tolerancia.

Por tanto, se realizan dos medidas de la VFC, ambas en condiciones de normoxia. La primera muestra los cinco minutos previos a someter al sujeto al test de tolerancia a la hipoxia y, la segunda, registra los cinco minutos posteriores al finalizar dicho test.

Sesión de exposición

Una vez finalizado el test de tolerancia, el voluntario sigue sentado en la posición anteriormente descrita para comenzar la segunda prueba de hipoxia. Se registran los 5 minutos previos de la variabilidad de la frecuencia cardiaca. Transcurridos estos minutos, comienza la sesión de exposición a hipoxia intermitente. La duración de la sesión fue de 64 minutos, con un porcentaje de oxígeno del 14% (equivalente a 3.250 m de altitud). El modo de aplicación es de forma intermitente, es decir, se realizaban periodos de hipoxia (4 minutos) seguidos de periodos de normoxia (4 minutos) hasta completar la sesión, de 64 minutos de duración. Al concluir dicha sesión se registraban los 5 minutos posteriores a la misma para analizar la VFC.

Por tanto, el registro de VFC se realiza en dos ocasiones, ambas en condiciones de normoxia. El primer registro corresponde a los 5 minutos previos al inicio de la sesión de exposición a la hipoxia y, el segundo, inmediatamente al acabar dicha sesión. Ambos registros tenían una duración de 5 minutos de duración.

Análisis estadístico

Con los datos extraídos de las distintas aplicaciones y software informáticos, se elaboró una hoja de cálculo a través del programa Excel® y, a su vez, fueron analizados con el software estadístico SPSS 24.0®.

Las variables cuantitativas se describieron mediante la media y la desviación típica. Se usó el coeficiente de variación para comprobar la dispersión de los datos. Mediante la prueba de Levene se verificó la igualdad de varianzas. Las comparaciones intraindividuo se hallaron mediante el test de la T pareada y las intergrupo con el test de T Student. Se consideraba que había diferencias o relaciones significativas cuando $p < 0,05$.

Resultados

6 varones y 7 mujeres conforman la población de estudio. En la Tabla 1 se describen las características de la población en general y separadas por sexo. Se evidencian diferencias significativas ($p < 0,05$) entre sexos en las variables de talla, peso y contorno de cintura, obteniéndose en los varones valores superiores.

Al comparar los valores de la VFC previos y posteriores a la realización del test de tolerancia no se han encontrado diferencias significativas en ninguno de los dominios: tiempo (Tabla 2) y frecuencia (Tabla 3).

En la sesión de hipoxia intermitente no se obtuvo diferencias significativas al comparar los valores del dominio de tiempo previos a la intervención de HNI con los obtenidos al final de la misma (Tabla 4). En el dominio de frecuencias (Tabla 5) tampoco se encontraron cambios significativos ($p > 0,05$).

Tabla 1. Características de la población global y separada por sexo.

Variable	Población	Media	SD	CV (%)	t	Sig. (bilateral)
Edad (años)	Global (n=13)	23	2,58	11,22		
	Varones (n=6)	22,0	1,26	5,73	-1,41	0,194
	Mujeres (n=7)	23,86	3,19	13,37		
Talla (cm)	Global (n=13)	173,75	9,24	5,32		
	Varones (n=6)	182,18	4,97	2,72	6,129	0,000
	Mujeres (n=7)	166,51	4,25	2,55		
Peso (Kg)	Global (n=13)	72,72	12,80	17,60		
	Varones (n=6)	83,21	5,27	6,33	4,270	0,001
	Mujeres (n=7)	63,72	10,01	15,71		
C. cintura (cm)	Global (n=13)	77,02	8,33	10,82		
	Varones (n=6)	83,21	4,99	6,00	3,411	0,006
	Mujeres (n=7)	71,71	6,82	9,51		
C. cadera (cm)	Global (n=13)	98,13	6,40	6,52		
	Varones (n=6)	101,11	4,69	4,63	1,667	0,124
	Mujeres (n=7)	95,57	6,87	7,19		
IMC (kg/m ²)	Global (n=13)	23,94	2,74	11,45		
	Varones (n=6)	25,08	1,44	5,74	1,45	0,176
	Mujeres (n=7)	22,97	3,30	14,37		

C. cintura: contorno de cintura; C. cadera: contorno de cadera; CV: coeficiente de variación; SD: desviación estándar; Sig. (bilateral): significación bilateral.

Tabla 2. Diferencias en el componente de dominio de tiempo de la variabilidad de la frecuencia cardiaca antes y después al test de tolerancia (n=13).

Variables de dominio de tiempo	Media	SD	Media de las diferencias	SD de la media de las diferencias	t	Sig. (bilateral)
Inicio RRmedio	869,35	143,16				
Final RRmedio	865,14	109,06	4,20692	60,03661	0,253	0,805
Inicio SDNN	73,21	21,19				
Final SDNN	79,81	35,09	-6,59908	24,80853	-0,959	0,356
Inicio RMSSD	50,40	23,73				
Final RMSSD	49,29	24,03	1,11462	11,52709	0,349	0,733
Inicio pNN50	26,09	19,76				
Final pNN50	24,53	19,70	1,56176	9,44434	0,596	0,562

RRmedio: media de los intervalos RR; SDNN: desviación estándar de los intervalos RR; rRMSSD: raíz cuadrada de las diferencias medias al cuadrado entre intervalos RR sucesivos; pNN50: porcentaje de RR sucesivos > 50 ms; SD: desviación estándar.

Tabla 3. Diferencias del dominio de frecuencia de la variabilidad de la frecuencia cardiaca antes y después al test de tolerancia (n=13).

Variables de dominio de frecuencia	Media	SD	Media de las diferencias	SD de la media de las diferencias	t	Sig. (bilateral)
Inicio VLF	2299,84	1664,02				
Final VLF	4165,95	5925,52	-1866,11	5979,313	-1,125	0,282
Inicio LF	2341,87	1972,07				
Final LF	2367,69	2039,74	-25,82077	1580,123	-0,059	0,954
Inicio HF	980,11	668,23				
Final HF	950,91	716,12	29,19838	249,249	0,422	0,68
Inicio LF/HF	3,05	2,45				
Final LF/HF	3,42	2,39	-0,3728	1,487	-0,904	0,384

VLF: muy baja frecuencia; HF: alta frecuencia; LF/HF: cociente de baja frecuencia entre alta; LF: baja frecuencia; SD: desviación estándar

Tabla 4. Diferencias en el dominio de tiempo de la variabilidad de la frecuencia cardiaca antes y después a la sesión de hipoxia (n=13).

Variables	Media	SD	Media de las diferencias	SD de la media de las diferencias	t	Sig. (bilateral)
Inicio RRmedio	854,55	106,70				
Final RRmedio	891,02	120,05	36,47	58,58	2,157	0,054
Inicio SDNN	81,74	35,92				
Final SDNN	80,01	24,45	-1,73	18,81	-0,319	0,756
Inicio rMSSD	47,09	23,70				
Final rMSSD	47,23	17,47	0,134	8,83	0,055	0,957
Inicio pNN50	21,48	17,06				
Final pNN50	23,73	15,72	2,25	5,44	1,436	0,179

RRmedio: media de los intervalos RR; SDNN: desviación estándar de los intervalos RR; rMSSD: raíz cuadrada de las diferencias medias al cuadrado entre intervalos RR sucesivos; pNN50: porcentaje de RR sucesivos > 50 ms; SD: desviación estándar.

Tabla 5. Diferencias en el dominio de frecuencia de la variabilidad de la frecuencia cardiaca antes y después a la sesión de exposición a HNI (n=13).

Variable	Media	SD	Media de las diferencias	SD de la media de las diferencias	t	Sig. (bilateral)
Inicio VLF	3085,77	2073,66				
Final_VLF	2736,16	3362,20	349,61	3059,15	0,396	0,700
Inicio LF	2289,60	1708,52				
Final LF	2503,52	2068,12	-213,92	1068,16	-0,694	0,502
Inicio HF	731,98	461,18				
Final HF	878,19	696,04	-146,22	482,91	-1,049	0,317
Inicio LF/HF	3,43	2,62				
Final LF/HF	3,67	2,31	-0,24	1,67	-0,505	0,623

VLF: muy baja frecuencia; HF: alta frecuencia; LF/HF: cociente de baja frecuencia entre alta; LF: baja frecuencia; SD: desviación estándar.

Discusión

En este estudio se ha analizado la respuesta de la variabilidad de la frecuencia cardiaca tras realizar un test de tolerancia y una sesión de exposición a la hipoxia normobárica. Se ha evidenciado que la hipoxia, a la altitud y tiempo de exposición descrita, no ocasiona cambios significativos en los dominios de tiempo y frecuencia de la VFC.

La población del presente estudio la componen 13 sujetos, tamaño que está en concordancia con la de otros autores²³⁻²⁵. De la misma forma ocurre con la edad media de los sujetos ($23 \pm 2,58$ años) siendo muy similar a la expuesta en otros estudios^{24,26}. Este hecho puede ser debido a que, actualmente, hay pocos estudios que analicen este fenómeno y, como paso previo, se ha realizado en personas jóvenes y sanas para, en un futuro, poder realizarlo en otras poblaciones sujetas a mayores riesgos, trabajando así en condiciones de seguridad.

La altitud simulada y el tiempo de exposición que hemos utilizado ha sido distinto dependiendo de si se realiza un test de tolerancia o una sesión de exposición a la hipoxia. En nuestro caso, durante el test de tolerancia se simuló una altitud de 5.050 metros (11% de O₂) durante un máximo de 10 minutos mientras que, Buccheit *et al*²³ sometieron a sus participantes a una altitud ligeramente inferior, 4.800 metros (11,5% O₂) durante dicho test. Sin embargo, el protocolo utilizado por estos autores difiere del nuestro, pues alternaban periodos de hipoxia en descanso con hipoxia durante el ejercicio físico, dificultando la comparación con nuestro estudio.

Dominio de tiempo y frecuencia de la variabilidad de la frecuencia cardiaca

Hemos comprobado, a través de otros trabajos, cómo puede variar la respuesta de la VFC según sea: una exposición breve^{23,25-27} o más prolongada a la hipoxia^{28,29}; la manera de administrar la hipoxia, es decir, de forma gradual²⁹⁻³¹ o súbitamente^{23,25}; la intensidad de la altitud: alta^{23,29,31}, moderada²⁴ o baja³⁰; así como los diferentes tipos de hipoxia utilizados: normobárica^{23,26} o hipobárica^{31,25}, ya que la respuesta del organismo ante cada uno de ellos es distinta y dificulta la comparación. Por ello, es importante determinar qué duración, intensidad y tipo de hipoxia influyen de forma favorable sobre la VFC.

Algunos autores coinciden en que una exposición a hipoxia normobárica genera una disminución en la rMSSD y un aumento del cociente LF/HF, es decir, una mayor activación del sistema nervioso simpático^{25,32} mientras que otros autores defienden un aumento del sistema nervioso parasimpático^{24,31}. Sin embargo, en el test de tolerancia que realizamos en el presente estudio, no se encontró diferencias significativas en los dominios de tiempo y frecuencia de VFC. Este hallazgo puede corroborar lo que otros autores sugerían y es que, para inducir cambios significativos en algunos dominios, como en el cociente LF/HF, es necesario duraciones más prolongadas, al menos de 30 minutos³³. No obstante, Botek *et al*²⁶ estipularon 10 minutos de exposición, pero con la diferencia que sometieron a sus participantes a una altitud mayor de la que describía la bibliografía, a 6.200 m (9,6% O₂). Estos autores²⁶ obtuvieron una disminución en la LF y un aumento en la HF. Por lo tanto, parece que mientras que en 2001 Bernardi *et al*³³ indicaban que era necesario más de 30 minutos de exposición a hipoxia para generar cambios en

los dominios de VFC, Botek *et al*²⁶, años más tarde, han conseguido influir sobre los dominios de VFC manteniendo exposiciones agudas (10 minutos), pero aumentando el estímulo de la altitud. Por esta razón, nuestro estudio evidencia que 5.050 metros durante diez minutos no es altitud suficiente para incidir sobre la VFC, siendo necesario disminuir más la proporción de oxígeno respirado.

Durante la sesión de entrenamiento se realizó un tiempo de exposición más prolongado (64 minutos) que en el test de tolerancia, pero disminuyendo la altitud y de manera interrumpida (hipoxia normobárica intermitente). Los 3.250 metros en los que se realizó la segunda prueba de hipoxia en este estudio pueden ser insuficientes para generar cambios en la variabilidad de la frecuencia cardíaca pese a realizar una exposición con una duración más prolongada. De esta manera, coincidirían estos hallazgos con Yamatho *et al*³⁴, quienes tampoco encontraron cambios significativos en su estudio. Estos autores³⁴ preveían que una altitud inferior a los 3.500 metros no era suficiente, apoyando esta hipótesis los datos de nuestro estudio ahora.

En algunos trabajos se emplea la exposición a la hipoxia de manera simultánea a la práctica de ejercicio físico^{34,35}. En este caso sí parece haber más unanimidad en que los dominios de tiempo y frecuencia absolutos varían más que al administrar la hipoxia en reposo. Sin embargo, esto puede ser debido al estímulo propio del ejercicio físico y no debido a la hipoxia. Por eso, consideramos que debe esclarecerse qué tiempos y qué altitudes son necesarias para generar un efecto beneficiario sobre la variabilidad de la frecuencia cardíaca antes de incluir otro estímulo de manera sincrónica como puede ser el ejercicio físico.

Conclusión

La variabilidad de la frecuencia cardíaca no evidencia cambios significativos en el dominio de tiempo ni en el de frecuencia después de la exposición a hipoxia normobárica. Por ello, consideramos que estos estímulos no son lo suficientemente estresantes para ocasionar cambios de forma aguda.

Conflicto de interés

Los autores no declaran conflicto de interés alguno.

Bibliografía

- Billman GE. Heart rate variability - A historical perspective. *Front Physiol.* 2011;2:1-13. DOI: 10.3389/fphys.2011.00086
- Shaffer F, Ginsberg JP. An overview of heart rate variability metrics and norms. *Front Public Health.* 2017;5:258. DOI: 10.3389/fpubh.2017.00258
- Sassi R, Cerutti S, Lombardi F, Malik M, Huikuri HV. Advances in heart rate variability signal analysis: joint position statement by the e- Cardiology ESC Working Group and the European Heart Rhythm Association co-endorsed by the Asia Pacific Heart Rhythm Society. *Europace.* 2015;17:1341-53. DOI: 10.1093/europace/euv015.
- Tarvainen MP, Niskanen JP, Lipponen JA, Ranta-Aho PO, Karjalainen PA. Kubios HRV--heart rate variability analysis software. *Comput Methods Programs Biomed.* 2014;113:210-20. doi: 10.1016/j.cmpb.2013.07.024.
- Calderón FJ, Cupeiro R, Peinado AB, Lorenzo-Capella I. Variabilidad de la frecuencia cardíaca y ejercicio ¿Fundamentación fisiológica?. *Rev Int Med Cienc Act Fis Deporte.* 2020;20:299-320. DOI: 10.15366/rimcafd2020.78.008
- Rodas G, Pedret C, Capdevila L, Ramos J. Variabilidad de la frecuencia cardíaca: concepto, medidas y relación con aspectos clínicos (I). *Arch Med Deporte.* 2008;23:41-7.
- Ortigosa J, Reigal RE, Carranque G, Hernández-Mendo A. Variabilidad de la frecuencia cardíaca: investigación y aplicaciones prácticas para el control de los procesos adaptativos en el deporte. *Rev Iberoam Psicol Ejerc Deporte.* 2018;13:121-30
- Veloza L, Jiménez C, Quiñones D, Polanía F, Pachón-Valero LC, Rodríguez-Triviño CY. Variabilidad de la frecuencia cardíaca como factor predictor de las enfermedades cardiovasculares. *Rev Colomb Cardiol.* 2019;26:205-10. DOI:10.1016/j.rccar.2019.01.006.
- Kircanski K, Williams LM, Gotlib IH. Heart rate variability as a biomarker of anxious depression response to antidepressant medication. *Depress Anxiety.* 2018;36:63-71. DOI: 10.1002/da.2284
- Hasty F, García G, Dávila H, Wittels H, Hendricks S, Chong S. Heart rate variability as a possible predictive marker for acute inflammatory response in COVID-19 patients. *Mil Med.* 2020;186:e34-e38. DOI: 10.1093/milmed/usaa405
- Bourdillon N, Yazdani S, Schmitt L, Millet GP. Effects of COVID-19 lockdown on heart rate variability. *PLoS One.* 2020;15:e0242303. DOI: 10.1371/journal.pone.0242303.
- Almeida-Santos MA, Barreto-Filho JA, Oliveira JL, Reis FP, da Cunha Oliveira CC, Sousa AC. Aging, heart rate variability and patterns of autonomic regulation of the heart. *Arch Gerontol Geriatr.* 2016;63:1-8. DOI: 10.1016/j.archger.2015.11.011.
- Saleem S, Hussain MM, Majeed SM, Khan MA. Gender differences of heart rate variability in healthy volunteers. *J Pak Med Assoc.* 2012;62:422-5.
- Rodas G, Pedret C, Capdevila L, Ramos J. Variabilidad de la frecuencia cardíaca: concepto, medidas y relación con aspectos clínicos (I). *Arch Med Deporte.* 2008;23:41-7
- Järvelin-Pasanen S, Sinikallio S, Tarvainen MP. Heart rate variability and occupational stress-systematic review. *Ind Health.* 2018;56:500-11. DOI: 10.2486/indhealth.2017-0190.
- Abellán-Aynés O, López-Plaza D, Alacid F, Naranjo-Orellana J, Manonelles P. Recovery of heart rate variability after exercise under hot conditions: the effect of relative humidity. *Wilderness Environ Med.* 2019;30:260-7. DOI: 10.1016/j.wem.2019.04.009.
- Abellán-Aynés O, Manonelles P, Alacid F. Cardiac Parasympathetic Withdrawal and Sympathetic Activity: Effect of Heat Exposure on Heart Rate Variability. *Int J Environ Res Public Health.* 2021;18:5934. DOI: 10.3390/ijerph18115934.
- Flueck JL, Schaufelberger F, Lienert M, Schäfer Olstad D, Wilhelm M, Perret C. Acute effects of caffeine on heart rate variability, blood pressure and tidal volume in paraplegic and tetraplegic compared to able-bodied individuals: a randomized, blinded trial. *PLoS One.* 2016;11:e0165034. DOI:10.1371/journal.pone.0165034
- Sondermeijer HP, van Marle AG, Kamen P, Krum H. Acute effects of caffeine on heart rate variability. *Am J Cardiol.* 2002;90:906-7. DOI: 10.1016/s00029149(02)02725-x.
- McMorris T, Hale B, Barwood M, Costello J, Corbett J. Effect of acute hypoxia on cognition: A systematic review and meta-regression analysis. *Neurosci Biobehav Rev.* 2017;74:225-32. DOI: 10.1016/j.neubiorev.2017.01.019
- Levine B. Intermittent hypoxic training: fact and fancy. *High Alt Med Biol.* 2002;3:177-93.
- Urdampilleta A, Gómez S, Martínez JM, Roche E. La eficacia de un programa de ejercicios de alta intensidad en hipoxia intermitente para la mejora de la fuerza-resistencia. *Rev esp educ fis deportes.* 2012;12:63-74.
- Buchheit M, Richard R, Doutreleau S, Lonsdorfer-Wolf E, Brandenberger G, Simon C. Effect of acute hypoxia on heart rate variability at rest and during exercise. *Int J Sports Med.* 2004;25:264-9. DOI: 10.1055/s-2004-819938
- Bhaumik G, Dass D, Bhattacharyya D, Sharma YK, Singh SB. Heart rate variability changes during first week of acclimatization to 3500 m altitude in Indian military personnel. *Indian J Physiol Pharmacol.* 2013;57:16-22.
- Basualto-Alarcón C, Rodas G, Galilea PA, Riera J, Pagés T, Ricart A, et al. Cardiorespiratory parameters during submaximal exercise under acute exposure to normobaric and hypobaric hypoxia. *Apunts Med Esport.* 2012;47:65-72. DOI:10.1016/j.apunts.2011.11.005
- Botek M, Krejci K, De Smet S, Gába A, McKune AJ. Heart rate variability and arterial oxygen saturation response during extreme normobaric hypoxia. *Auton Neurosci.* 2015;190:40-5. DOI: 10.1016/j.autneu.2015.04.001
- Giles D, Kelly J, Draper N. Alterations in autonomic cardiac modulation in response to normobaric hypoxia. *Eur J Sport Sci.* 2016;16:1023-31. DOI: 10.1080/17461391.2016.1207708
- Halliwil JR, Morgan BJ, Charkoudian N. Peripheral chemoreflex and baroreflex interactions in cardiovascular regulation in humans. *J Physiol.* 2003;552:295-302. DOI: 10.1113/jphysiol.2003.050708
- Guger C, Krausert S, Domej W, Edlinger G, Tannheimer M. EEG, ECG and oxygen concentration changes from sea level to a simulated altitude of 4000 m and back to sea level. *Neurosci Lett.* 2008;442:123-7. DOI: 10.1016/j.neulet.2008.06.075
- Iwasaki K, Ogawa Y, Aoki K, Saitoh T, Otsubo A, Shibata S. Cardiovascular regulation response to hypoxia during stepwise decreases from 21% to 15% inhaled oxygen. *Aviat Space Environ Med.* 2006;77:1015-9.
- Zhang D, She J, Zhang Z, Yu M. Effects of acute hypoxia on heart rate variability, sample entropy and cardiorespiratory phase synchronization. *Biomed Eng Online.* 2014;13:73. DOI: 10.1186/1475-925X-13-73

32. Rupp T, Leti T, Jubeau M, Millet GY, Bricout VA, Levy P, *et al.* Tissue deoxygenation kinetics induced by prolonged hypoxic exposure in healthy humans at rest. *J Biomed Opt.* 2013;18:095002. DOI: 10.1117/1.JBO.18.9.095002.
33. Bernardi L, Passino C, Wilmerding V, Dallam GM, Parker DL, Robergs RA, *et al.* Breathing patterns and cardiovascular autonomic modulation during hypoxia induced by simulated altitude. *J Hypertens.* 2001;19:947-58
34. Yamamoto Y, Hoshikawa Y, Miyashita M. Effects of acute exposure to simulated altitude on heart rate variability during exercise. *J Appl Physiol.* 1996; 81:1223-29 DOI: 10.1152/jappl.1996.81.3.1223
35. Lizamore CA, Kathiravel Y, Elliott J, Hellemans J, Hamlin MJ. The effect of short-term intermittent hypoxic exposure on heart rate variability in a sedentary population. *Physiol Int.* 2016;103:75-85. DOI: 10.1556/036.103.2016.1.7.