

MÁSTER EN CIENCIAS DE LA ACTIVIDAD FÍSICA Y DEL DEPORTE

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Respuestas fisiológicas a hipoxia aguda en reposo y
rendimiento inmediato en contrarreloj en ciclismo.

Jesús Torres Pérez

Vitoria-Gasteiz, 17 de junio de 2022

Respuestas fisiológicas a hipoxia aguda en reposo y rendimiento inmediato en contrarreloj en ciclismo.

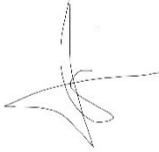
Trabajo Fin de Máster para optar al Título de Máster en **Ciencias de la Actividad Física y del Deporte**

Elaborado por Jesús Torres Pérez

Tutor/a Dr./Dra. D./D^a Javier Yanci Irigoyen

En Vitoria-Gasteiz, a 17 de junio de 2022

Firma de/de la alumno/a:



Fdo: Jesús Torres Pérez

Vº.Bº. del Tutor/a:



Fdo: Dr./Dra. D./D^a Javier Yanci Irigoyen

DECLARACIÓN DE FORMATO DE REVISTA

Journal of Sports and Health Science

https://www.elsevier.com/_data/promis_misc/JSHS%20submission%20sample.pdf

Respuestas fisiológicas a hipoxia aguda en reposo y rendimiento inmediato en contrarreloj en ciclismo.

Jesús Torres Pérez^{1*}, Javier Yanci Irigoyen¹.

¹²Facultad de Educación y Deporte, Universidad del País Vasco (UPV/EHU),
Vitoria-Gasteiz, 01006, España.

*jsstorres009@gmail.com

RESUMEN:

Objetivo: la exposición a hipoxia ha sido estudiada previamente en relación con el rendimiento físico, pero se desconocen hasta el momento los efectos inmediatos de la exposición aguda en reposo en el posterior rendimiento físico. Este estudio trata de observar las respuestas frente a la hipoxia aguda en reposo, analizando el rendimiento posterior a la exposición a hipoxia en una prueba de ciclismo contrarreloj en condiciones de normoxia. Por último, se analizan las relaciones entre las respuestas fisiológicas tras exposición a hipoxia y variables de rendimiento físico durante la contrarreloj en ciclismo.

Métodos: nueve ciclistas de clase nacional participaron en el estudio, se midieron variables metabólicas y cardiorrespiratorias antes y después de la exposición a hipoxia aguda normobárica en reposo durante 30 min.s. Posteriormente se realizó una prueba de ciclismo contrarreloj sobre cicloergómetro durante 20 min.s en normoxia en la que se midieron las mismas variables pre y post exposición a hipoxia, además se midieron variables de rendimiento (vatios) y esfuerzo percibido durante la contrarreloj simulada.

Resultados: se encontraron modificaciones en variables de intercambio gaseoso tras exposición a hipoxia, aunque la exposición a hipoxia aguda en reposo no afectó al rendimiento en contrarreloj simulada en condiciones de normoxia. Además, algunas de las variables tras la exposición a hipoxia guardan relación con variables de rendimiento en la contrarreloj simulada, destacando la correlación entre variables de respuesta de intercambio gaseoso post exposición a hipoxia y variables de la misma naturaleza durante el rendimiento en contrarreloj.

Conclusiones: la exposición a hipoxia aguda en reposo tiene influencia en respuestas fisiológicas inmediatas, aunque el rendimiento en contrarreloj en ciclismo en normoxia no se ve alterado. Algunas de las respuestas frente a exposición a hipoxia aguda pueden ayudar a predecir variables de rendimiento durante contrarreloj simulada en ciclismo en normoxia. Por el momento existe una limitada evidencia acorde con los objetivos de este estudio que permita contrastar los resultados. Así pues, son necesarios más estudios que se centren en el análisis de la respuesta fisiológica a hipoxia aguda en reposo y el rendimiento físico inmediato en normoxia.

PALABRAS CLAVE: altitud, ciclismo, fisiología, hipocapnia.

INTRODUCCIÓN

La hipoxia se ha definido como aquella situación en la que la asimilación de oxígeno respirado se ve disminuida, bien por una menor presión parcial de oxígeno en ambiente o por una menor concentración de oxígeno en el aire inspirado ¹. En este sentido, una menor disponibilidad de asimilación de oxígeno provoca que el suministro de oxígeno a los tejidos se vea comprometido y con ello el rendimiento físico momentáneo, especialmente el rendimiento aeróbico ². Como consecuencia, ante la reducida capacidad de asimilación de oxígeno se desencadenan una serie de respuestas que, a medio y largo plazo, conducen a adaptaciones que mejoren el rendimiento. Posiblemente por este motivo, son numerosos los deportistas de resistencia en la actualidad los que utilizan distintos métodos de exposición a hipoxia, con el objetivo de desencadenar las respuestas fisiológicas adecuadas que se manifiesten en la mejora del rendimiento deportivo ³.

A lo largo de las últimas décadas, se han publicado múltiples estudios científicos en los que se han analizado los efectos de distintos métodos de entrenamiento y exposición a hipoxia en deportistas de distintas modalidades deportivas ⁴⁻⁷ y en ciclistas de clase internacional en la mejora del rendimiento deportivo ^{8,9}. Entre otros, los métodos cuyos resultados parecen ser más positivos en el uso de hipoxia y entrenamiento en la mejora del rendimiento se basan principalmente en la exposición a hipoxia en reposo (vivir arriba) y entrenamiento a nivel del mar (entrenar abajo) ⁵, frente a la metodología clásica que consiste en la exposición a hipoxia en reposo (vivir arriba) y entrenamiento en hipoxia (entrenar arriba), la cual ha mostrado limitaciones en el desarrollo de la intensidad del entrenamiento ¹⁰ y en la recuperación ¹¹. En este sentido, los resultados de las últimas aportaciones metodológicas sobre el uso de la hipoxia en la mejora del rendimiento se basan en adquirir las adaptaciones producidas por la exposición a hipoxia (vivir arriba) y no comprometer la intensidad y duración del entrenamiento (entrenar abajo) ^{12,13}, aunque surgen diferentes aplicaciones metodológicas en función de las respuestas y adaptaciones deseadas ¹⁴. Así pues, atendiendo a la literatura científica, se ha descrito que la exposición a hipoxia en periodos continuados (vivir arriba) puede tener efectos positivos sobre el rendimiento deportivo en ciclistas ^{15,16}. Concretamente en ciclismo, encontramos que la metodología “vivir arriba y entrenar abajo” durante aproximadamente tres semanas, es hasta el momento, la que más evidencias de mejora en el rendimiento presenta ^{8,16}. Estudios en rendimiento en ciclismo a nivel del mar tras vivir arriba (2000-2300 msnm) y entrenar abajo (cercano a nivel del mar <1000 msnm), encontraron mejoras en ciclistas entrenados en valores de consumo de oxígeno máximo (VO₂ máximo) y rendimiento en contrarreloj principalmente explicados por el aumento de hemoglobina y la capacidad tampón del músculo estriado ⁹. A pesar de que estos métodos de exposición a hipoxia y entrenamiento parecen tener efectos positivos en corredores de ciclismo, el coste de recursos económicos, personales, humanos, temporales y logísticos es elevado al aplicar estas prácticas. En muchas ocasiones, los equipos y ciclistas no pueden realizar este tipo de entrenamientos y exposiciones a hipoxia en todos los momentos deseados de la temporada. Por ese motivo, en los últimos años también se han analizado los efectos de exposición a hipoxia y entrenamiento mediante hipoxia aguda, consistiendo en periodos de exposición de unas pocas horas a altitud (natural o simulada) elevada: 2000-5000 msnm ¹⁷ pudiendo realizarse distintas situaciones de exposición a altura y entrenamiento, pre y post competición de una forma fácil y accesible ¹⁸, con el propósito de obtener unas respuestas y adaptaciones adecuadas ³.

La hipoxia aguda en reposo hace que se vea comprometida la asimilación de oxígeno por parte del organismo, lo cual en primera instancia hará que disminuya el rendimiento bajo estas condiciones y por otro lado hará que se desencadenen respuestas comprendidas entre una a dos horas hasta un máximo de 5 días¹⁹ que puedan llevar a adaptaciones fisiológicas mejorando así el rendimiento. Algunos estudios sobre la influencia de la hipoxia aguda en el rendimiento bajo condiciones de hipoxia, en contrarreloj en ciclismo, han visto como las modificaciones en el rendimiento vienen principalmente explicadas por la modificación aguda de variables de intercambio gaseoso producidas por la exposición a hipoxia, aunque existen grandes variaciones individuales en la respuesta a la hipoxia y el rendimiento²⁰. Estas variaciones individuales podrían explicar, en parte, las evidencias diversas en la bibliografía sobre las respuestas ante exposición a hipoxia (en reposo y en ejercicio) ya que otros estudios llevado a cabo en sujetos sanos, con un tiempo de exposición a hipoxia aguda de 60 min.s/día durante 4 semanas no encontraron mejoras en el rendimiento en ciclismo mediante adaptaciones que perduren en el tiempo²¹. Por el momento se desconoce en gran medida la influencia de las respuestas ante la hipoxia aguda en el rendimiento inmediato (tras exposición a hipoxia) en ciclismo en normoxia ya que los estudios disponibles en la bibliografía se han centrado en analizar la relación entre la repuesta ventilatoria en hipoxia en reposo y la disminución del rendimiento en hipoxia²⁰ sin analizar el efecto inmediato de la exposición hipoxia aguda sobre el rendimiento en ciclismo en condiciones de normoxia. Debido a las respuestas cardiorrespiratorias tras la exposición a hipoxia mencionadas y la correlación de estas variables con el rendimiento en ciclismo en contrarreloj de media y larga duración (20-60 min.s)²², surge la motivación en la investigación de analizar si las respuestas fisiológicas tras exposición a hipoxia aguda guardan relación con en el rendimiento en ciclismo en ambiente normóxico en contrarreloj.

Por lo tanto, los objetivos del presente estudio fueron: 1) conocer las respuestas fisiológicas (variables sanguíneas, metabólicas y cardiorrespiratorias) de ciclistas entrenados de clase nacional ante exposición a hipoxia aguda en reposo o a condiciones de normoxia, 2) conocer si el rendimiento (variables mecánicas y fisiológicas) en una prueba contrarreloj simulada durante 20 minutos se veía alterado tras la exposición a hipoxia aguda (o normoxia como condición de placebo) y 3) analizar si las respuestas fisiológicas tras la exposición a hipoxia aguda en reposo están asociadas con el rendimiento en contrarreloj simulada en normoxia.

MÉTODO

Participantes

Nueve ciclistas ($26,0 \pm 3,4$ años, $169,3 \pm 5,9$ cm, $63,9 \pm 5,1$ kg, $9,6 \pm 1,0$ horas de entrenamiento/semana, $4,6 \pm 0,3$ W/Kg en una prueba de 20 min.s en el año 2022), entrenados y de clase nacional²³ participaron en el estudio. Del total de participantes, 7 ciclistas fueron de sexo masculino y 2 de sexo femenino. Los criterios de inclusión para participar en el presente estudio fueron: (1) tener una experiencia en la práctica de ciclismo competitivo de al menos 6 años, (2) haber participación en competiciones de ciclismo a nivel nacional, (3) realizar un volumen de entrenamiento semanal de al menos 8 horas y (4) tener una correcta predisposición para cumplir con las exigencias de las

condiciones de control, previas a la toma de datos, y para el desarrollo de las sesiones en el laboratorio. Previo al comienzo del estudio se informó a todos los participantes de los riesgos y beneficios de la participación en el mismo y se les pidió que rellenaran un consentimiento informado. El estudio fue aprobado por el Comité de Ética para la Investigación con Seres Humanos (CEISH) de la Universidad del País Vasco (UPV/EHU) (NoRefCEid: M10/2017/200). El presente estudio siguió los estándares éticos establecidos en la Declaración de Helsinki en 2013.

Procedimiento

Todos los participantes realizaron dos sesiones de test en dos días diferentes en laboratorio. Entre las dos sesiones transcurrieron al menos 48 h y como máximo 6 días. Durante las 24 h previas a las sesiones de test, los participantes no realizaron ningún ejercicio extenuante, no consumieron alcohol ni bebidas estimulantes que pudieran alterar las condiciones del ensayo, así como no reportaron molestias o sobrecargas que pudieran hacer diferir las condiciones a la hora de realizar las sesiones en el laboratorio. Se recogieron datos generales sobre el número de horas de entreno semanales y el mejor registro de potencia durante 20 min.s (MMP20) en la temporada 2022. Tanto en la primera como en la segunda sesión se tomaron valores sanguíneos de serie roja, para posteriormente, ser expuestos durante 30 min.s a un protocolo de hipoxia normobárica o normoxia (placebo) en el cual se reprodujeron los mismos procedimientos de medición y de colocación del aparataje simulador de hipoxia, con la salvedad de que el regulador de suministro de oxígeno se mantuvo completamente liberado de manera que la fracción inspiratoria de oxígeno suministrado a la máscara de respiración fue la de ambiente ($FiO_2 = 20.9\%$).

La exposición a hipoxia o normoxia se realizó de forma aleatorizada alterna en la aplicación de hipoxia o normoxia (placebo) para no interferir en el porcentaje de oxígeno (O_2) suministrado por el generador tras en un tiempo continuado (sobreeso) y asegurar así mismas condiciones de fracción inspirada de oxígeno (FiO_2) en condiciones de hipoxia. Los participantes no habían experimentado antes exposición a hipoxia artificial, por lo que no reconocían si estaban sometidos a exposición de hipoxia o normoxia. Previamente a la exposición a hipoxia o normoxia (momento “pre”), así como posteriormente a la exposición (momento “post”) se realizaron mediciones de glucosa, lactato, saturación arterial de oxígeno (SpO_2), frecuencia cardíaca (FC) y valores de intercambio de gases en reposo durante 10 min.s. Posteriormente a la exposición a hipoxia o normoxia y a las mediciones post, los participantes realizaron un calentamiento durante 5 min.s que consistió en pedaleo constante a 90 repeticiones por min. a una intensidad del 70% de MMP20, para más tarde realizar una prueba contrarreloj de carácter maximal sobre cicloergómetro durante 20 min.s. Todas las condiciones de medición y reposo fueron llevadas a cabo en el laboratorio bajo condiciones ambientales de 20-22°C y 30-35% de humedad, a una altitud de 539 m.s.n.m. En la figura 1 se expone un esquema del procedimiento del estudio.

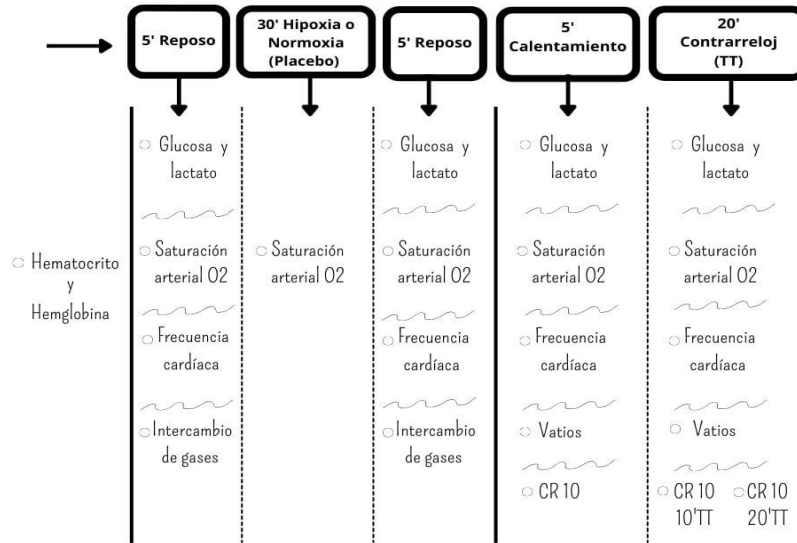


Figura 1. Esquema del procedimiento de la investigación y test realizados.

Mediciones

Mediciones iniciales

Hematocrito y hemoglobina: para conocer los valores de hematocrito y hemoglobina, se obtuvo una gota de sangre capilar sobre el dedo índice de la mano derecha de los participantes utilizando un medidor de parámetros de hematocrito y hemoglobina (Diacare BC-101, Dicare®, Shenzhen, China) atendiendo a los procedimientos establecidos previamente por Ernst (2004). A partir de esta medición previa al comienzo de mediciones preexposición a hipoxia (o normoxia) se obtuvo el porcentaje de recuento de masa eritrocitaria en sangre capilar así como la concentración de hemoglobina en sangre capilar ²⁵.

Mediciones “pre y post” exposición a protocolo de hipoxia y normoxia.

Concentración de glucosa sanguínea: mediante un glucómetro (Accu-Chek Aviva, Accu-Ceck®, Barcelona, España) se realizó una punción sobre el dedo índice de la mano derecha previamente esterilizado siguiendo el procedimiento propuesto por Ernst (2004). A través de esta medición se obtuvieron valores de glucosa en sangre del momento puntual en el que se recogió la muestra ²⁶.

Concentración de lactato: mediante el procedimiento propuesto por Ernst (2004), se realizó una punción sobre el lóbulo de la oreja derecha de los participantes, previamente esterilizada, obteniéndose una gota de sangre para su análisis mediante un lactacidómetro (Lactate Pro, Arkray, KDK Corporation®, Kyoto, Japón). Mediante esta medición se obtuvieron valores de lactato en sangre del momento puntual en el que se recogió la muestra ²⁷.

Saturación arterial de oxígeno (SpO₂): con el fin de conocer la saturación arterial de oxígeno, se utilizó un pulsioxímetro, (300I, Konica Minolta®, Tokio, Japón) colocado sobre el dedo índice de la mano derecha ²⁸. Gracias a esta medición se recogieron valores de saturación arterial de oxígeno.

Frecuencia cardíaca (FC): mediante una banda de medición de frecuencia cardíaca (Polar H10, Polar Electro Oy®, Kempele, Finlandia) ²⁹, situada en la zona media del tórax de cada participante y un dispositivo de recogida de datos (Garmin 520, Garmin Ltd.®, Olathe, Kansas) se midió la frecuencia cardíaca (FC) de los participantes ³⁰.

Intercambio de gases: utilizando un analizador de gases (Medisoft™ Ergocard, Medisoft Group, Sorinnes, Bélgica), calibrado previamente para cada una de las mediciones; mediante una bombona de gas de referencia (nSpire Koko, nSpire Health Inc.®, Longmont, CO, EEUU). Los participantes se colocaron sentados sobre una silla, sin realizar ningún esfuerzo físico para asegurar las mediciones de intercambio de gases representativas del estado fisiológico ³¹. Se midió el intercambio de gases en condiciones de reposo, obteniendo variables de consumo de oxígeno (VO₂), consumo de oxígeno relativo (VO_{2r}), equivalente ventilatorio de oxígeno (EqO₂), equivalente ventilatorio de dióxido de carbono (EqCO₂), presión final espirada de oxígeno (PetO₂) y presión final espirada de dióxido de carbono (PetCO₂).

Protocolo de exposición a hipoxia/normoxia

A los participantes, situados en posición de reposo, sentados, se les colocaba una máscara de respiración de no retorno (Hypoxico Biolaster, Biolaster®, Andoain, España), conectada a un generador normóxico de altitud (Hypoxico, Hypoxico, Inc.®, New York, E.E.U.U) ³², para realizar la exposición a hipoxia o normoxia de manera aleatorizada en dos sesiones. En el caso de exposición a hipoxia normobárica fue realizada atendiendo a valores equivalentes de fracción inspirada de oxígeno (FiO₂) de 9%, simulando así una altitud de 4500 m.s.n.m., dicha exposición fue llevada cabo durante 30 min.s ³³. En el caso del protocolo de exposición a hipoxia, la carga hipóxica fue controlada mediante el uso de un pulsioxímetro ³⁴.

Prueba simulada de contrarreloj en cicloergómetro

Atendiendo al protocolo de test hiperbólico ³⁵, utilizando un cicloergómetro (Lode Escalibur, Lode®, Groningen, Holanda), todos los participantes en las dos sesiones (sesión de hipoxia y sesión de normoxia) realizaron un test de contrarreloj simulada durante 20 min.s ³⁶. Previamente a la realización de la contrarreloj simulada, el ergómetro fue personalizado con las medidas que los ciclistas disponían en sus bicis convencionales (altura de sillín, alcance punta de sillín-manillar y longitud de bielas). Antes de iniciar la prueba, los participantes realizaron un calentamiento durante 5 min.s al 70% de MMP20. Durante la contrarreloj simulada, cada participante podía seleccionar la potencia, incrementar o disminuir manualmente la resistencia ofrecida por el cicloergómetro (mediante consola de manejo del cicloergómetro) para poder aplicar una cadencia de pedaleo deseada y así aumentar la carga final a desarrollar en vatios (W). Durante la

contrarreloj, las variables de carga (W) fueron ocultadas a los sujetos tratando de evitar la autorregulación en la contrarreloj en base a datos de carga externa, mostrando únicamente el tiempo transcurrido ²². Durante la prueba se recogieron los *vatios medios* (W) desarrollados por cada participante durante los 20 min.s de contrarreloj simulada ³⁶ así como la potencia relativa media de la prueba (W/Kg) ³⁷. Además, en los min.s 0, 10 y 20 de la contrarreloj se midieron las mismas variables que en los momentos pre y post exposición a hipoxia o normoxia (glucosa, lactato, SpO₂) mientras que las variables de FC e intercambio gaseoso fueron recogidas durante los 20 min.s de contrarreloj.

Durante la contrarreloj, se registró la *percepción subjetiva de esfuerzo*. Mediante la escala de Borg “CR10” ³⁸, los participantes debían declarar la percepción subjetiva del esfuerzo de la prueba contrarreloj en el momento en el que se recogió el registro y de manera retrospectiva. Dicha escala de orden numérico ordinal desde el 0 al 10, atiende al nivel de exigencia física percibida por el sujeto, además, cuenta con una breve descripción escrita que va desde “nada” hasta “extremadamente duro” correspondiendo dicha descripción con punto de partida numérico 0 y el final de la escala con valor numérico 10. La escala se encontraba visualmente disponible en el momento de la valoración de los participantes del esfuerzo, se realizó una información previa sobre el funcionamiento y los participantes se encontraban familiarizados con la escala.

Análisis estadístico

Los resultados del estudio se muestran como media y desviación típica (DT). Para analizar las diferencias en los resultados obtenidos en los distintos momentos del estudio pre vs. post protocolo de intervención a hipoxia o normoxia, las diferencias en el momento post entre la exposición a hipoxia o normoxia y las diferencias en los resultados en la contrarreloj simulada entre los resultados de la sesión de hipoxia o normoxia se utilizó una prueba t de muestras relacionadas. Para conocer la magnitud de las diferencias obtenidas en las variables, se calculó el porcentaje de diferencia (Dif %) y el tamaño del efecto (ES) de Cohen, ³⁹. El ES fue clasificado como: alto ($\geq 0,8$), moderado (0,8-0,5), pequeño (0,5-0,2), y trivial ($< 0,2$) ³⁹. Con el fin de conocer la asociación entre el porcentaje de diferencia (pre vs. post protocolo de hipoxia o normoxia) en las distintas variables analizadas y los resultados de las variables obtenidas en la contrarreloj simulada, así como para conocer la relación de los valores post protocolo de hipoxia o normoxia, con los resultados obtenidos en la prueba de contrarreloj simulada se utilizó la correlación de Pearson (r). Los niveles de correlación fueron clasificados como: perfecta (1,0), muy alta ($< 1,0-0,9$), alta ($< 0,9-0,7$), moderada ($< 0,7-0,4$), muy baja ($< 0,4-0,2$), nula (0) ⁴⁰. El análisis de datos se realizó utilizando el software de tratamiento estadístico JASP (JASP, JASP Proyecto Libre, Universidad de Ámsterdam, Ámsterdam, Holanda). La significancia estadística quedó fijada bajo las condiciones $p < 0,05$.

RESULTADOS

Los resultados de las mediciones iniciales de las variables sanguíneas de serie roja fueron de un $44,1 \pm 2,1$ % de hematocrito y $15,0 \pm 0,7$ g/dL de hemoglobina en la sesión realizando las mediciones antes de la exposición a hipoxia y de un $44,8 \pm 4,5$ % de

hematocrito y $15,2 \pm 1,5$ g/dL de hemoglobina en la sesión antes de la exposición a normoxia. No hubo diferencias significativas en ninguno de estos valores iniciales antes de someterse a hipoxia o normoxia.

Los resultados correspondientes al pre y post exposición al protocolo de hipoxia y al protocolo de normoxia se exponen en la tabla 1. Tras la exposición a hipoxia, únicamente se observan cambios significativos entre el pre y el post en las variables EqVCO₂ ($p = 0,001$, ES = -1,6), PetO₂ y PetCO₂ ($p < 0,05$, ES = 0,96-0,84). Tras la exposición a normoxia sólo se observaron cambios significativos entre el pre y el post en la variable PetO₂ ($p = 0,05$, ES = -1,23). Mientras que en momento pre no se observó ninguna diferencia significativa entre la exposición a hipoxia y normoxia, en el momento post, cuando los participantes se expusieron a hipoxia obtuvieron mayores valores de VO₂ y VO₂ relativo que cuando se expusieron a normoxia ($p < 0,05$, ES = -0,93).

Tabla 1. Resultados obtenidos antes (pre) y después (post) tanto de la exposición a hipoxia como de la exposición a normoxia en las variables analizadas.

	Pre	Post	ES (Dif %)	p
EXPOSICIÓN A HIPOXIA				
Glucosa (mg/dL)	101,8 ± 17,6	99,2 ± 9,8	0,12 (-0,00)	NS
Lactato (mmol/dL)	1,5 ± 0,3	1,5 ± 0,3	0,13 (-0,00)	NS
SpO ₂ (%)	97,5 ± 0,8	97,5 ± 2,0	0,25 (-0,56)	NS
FC (ppm)	62,6 ± 11,5	62,6 ± 3,7	0,00 (2,7)	NS
Intercambio de gases				
Vo ₂ (L/min)	0,3 ± 0,0	0,3 ± 0,0	-0,10 (2,9)	NS
Vo ₂ r (mL/kg/min)	5,4 ± 1,1	5,5 ± 0,6	-0,05 (2,9x)	NS
EqO ₂	33,6 ± 3,7	32,8 ± 4,4	0,49 (-4,8)	NS
EqCO ₂	38,3 ± 3,8	42,4 ± 4,7***	-1,58 (10,7)	0,001
PetO ₂ (mmHg)	96,5 ± 3,6	92,4 ± 4,8*	0,96 (4,2)	0,021
PetCO ₂ (mmHg)	35,1 ± 3,4	32,6 ± 3,8*	0,84 (-6,9)	0,035
EXPOSICIÓN A NORMOXIA				
Glucosa (mg/dL)	91,5 ± 9,2	100,0 ± 15,4	-0,65 (9,4)	NS
Lactato (mmol/dL)	1,7 ± 0,3	1,444 ± 0,2	0,65 (-0,1)	NS
SpO ₂ (%)	97,2 ± 1,0	97,3 ± 0,8	-0,09 (1,2)	NS
FC (ppm)	59,3 ± 9,9	59,5 ± 10,1	-0,010 (0,4)	NS
Intercambio de gases				
Vo ₂ (L/min)	0,3 ± 0,0	0,3 ± 0,0#	-0,13 (1,2)	NS
Vo ₂ r (mL/kg/min)	4,8 ± 0,4	4,9 ± 0,6#	-0,15 (1,2)	NS
EqO ₂	37,0 ± 4,0	34,5 ± 5,4	0,54 (-6,6)	NS
EqCO ₂	38,9 ± 4,9	41,0 ± 5,0	0,54 (5,7)	NS
PetO ₂ (mmHg)	99,4 ± 3,5	95,3 ± 4,6**	1,23 (-4,0)	0,006
PetCO ₂ (mmHg)	34,4 ± 3,2	32,8 ± 2,2	0,62 (-4,4)	NS

EqCO₂: valores medios de equivalente respiratorio de dióxido de carbono. EqO₂: valores medios de equivalente respiratorio de oxígeno. FC: frecuencia cardíaca. NS: no diferencia significativa. ES: tamaño del efecto. Dif %: diferencia entre valores post y pre expresada en porcentaje. PetCO₂: valores medios de presión final espirada de dióxido de carbono. PetO₂: valores medios de presión final espirada de oxígeno. Post: momento después de la exposición a hipoxia o normoxia. Pre: momento antes de la exposición a hipoxia o normoxia. SpO₂: saturación arterial de oxígeno. VO₂ r: valores medios de consumo de oxígeno relativo. VO₂: valores medios de consumo de oxígeno.

* $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $\leq 0,001$ diferencias significativas respecto a los valores pre.
$p < 0,05$ diferencias significativas entre exposición a hipoxia y normoxia.

En la tabla 2 se exponen los resultados obtenidos en la prueba contrarreloj por los participantes tras la exposición a hipoxia y tras la exposición a normoxia. No se observó ninguna diferencia significativa en las variables analizadas en la contrarreloj tras la exposición a hipoxia o normoxia.

Tabla 2. Resultados de variables metabólicas, cardiorrespiratorias, de carga interna y externa durante la contrarreloj simulada.

Variable	Normoxia	Hipoxia	ES (Dif%)	p
GLUCOSA _{WUP} (mg/dL)	95,4 ± 7,9	90,1 ± 12,2	0,574 (-5,6)	NS
GLUCOSA _{TT10} (mg/dL)	99,5 ± 20,5	96,7 ± 13,3	0,115 (-2,8)	NS
GLUCOSA _{TT20} (mg/dL)	113,5 ± 17,3	111,7 ± 27,3	0,052 (-1,6)	NS
GLUCOSA _{DIF_WUP-TT20} (mg/dL)	19,3 ± 19,6	24,2 ± 27,7	-0,124 (25,4)	NS
LACTATO _{WUP} (mmol/dL)	1,9 ± 0,5	1,8 ± 0,6	0,118 (-5,3)	NS
LACTATO _{TT10} (mmol/dL)	6,3 ± 2,8	8,1 ± 2,2	-0,485 (28,6)	NS
LACTATO _{TT20} (mmol/dL)	7,8 ± 2,0	9,1 ± 2,7	-0,592 (16,7)	NS
LACTATO _{DIF_WUP-TT20} (mmol/dL)	3,3 ± 1,3	4,5 ± 2,3	-0,651 (36,4)	NS
SpO ₂ _{WUP} (%)	97,2 ± 1,2	95,4 ± 2,2	0,687 (-1,9)	NS
SpO ₂ _{TT10} (%)	92,3 ± 2,5	91,5 ± 1,4	0,350 (-0,9)	NS
SpO ₂ _{TT20} (%)	93,5 ± 1,7	91,4 ± 4,5	0,500 (-2,2)	NS
FC _{WUP} (ppm)	117,1 ± 14,0	123,7 ± 19,2	-0,288 (5,6)	NS
FC _{TT10} (ppm)	171,4 ± 9,8	176,4 ± 12,6	-0,487 (2,9)	NS
FC _{TT20} (ppm)	176,5 ± 11,5	180,4 ± 11,0	-0,378 (2,2)	NS
FC _{MEDIATT} (ppm)	165,2 ± 11,4	169,6 ± 13,8	-0,452 (2,7)	NS
VO ₂ _{TT} (L/min)	3,6 ± 0,3	3,6 ± 0,4	0,101 (-2,2)	NS
VO ₂ _{rTT} (ml/kg/min)	57,6 ± 4,2	56,8 ± 4,9	0,130 (-1,4)	NS
EqO ₂ _{TT}	31,5 ± 2,9	34,5 ± 6,4	-0,502 (9,5)	NS
EqCO ₂ _{TT}	31,3 ± 2,6	33,14 ± 4,3	-0,411 (5,9)	NS
PetO ₂ _{TT} (mmHg)	102,3 ± 3,7	103,4 ± 3,9	-0,303 (1,1)	NS
PetCO ₂ _{TT} (mmHg)	35,2 ± 2,7	34,6 ± 2,9	0,305 (-1,7)	NS
POTENCIA _{TT} (W)	273,2 ± 31,8	277,8 ± 33,3	-0,214 (1,7)	NS
POTENCIA _{TTTr} (W/kg)	4,2 ± 0,4	4,3 ± 0,3	-0,211 (2,4)	NS
CR10 _{WUP}	3,1 ± 1,5	2,7 ± 0,9	0,216 (-12,9)	NS
CR10 _{TT10}	7,0 ± 0,9	7,3 ± 0,6	-0,257 (4,3)	NS
CR10 _{TT20}	9,0 ± 1,0	9,1 ± 0,8	-0,178 (1,1)	NS
CR10TT _{MEDIA}	6,3 ± 1,0	6,4 ± 0,6	-0,033 (1,6)	NS

CR10: valores de percepción del esfuerzo. **Dif %:** diferencia entre valores de hipoxia y normoxia expresada en porcentaje. **DIF_WUP-TT20:** diferencia entre valores WUP Y TT20. **EqCO₂_{TT}:** valores medios de equivalente ventilatorio de dióxido de carbono de oxígeno durante la contrarreloj. **EqO₂_{TT}:** valores medios de equivalente ventilatorio de oxígeno de oxígeno durante la contrarreloj. **ES:** tamaño del efecto. **FC:** frecuencia cardíaca. **MEDIA:** valor medio durante la contrarreloj. **NS:** no diferencia significativa. **PetCO₂_{TT}:** valores medios de presión espirada final de dióxido de carbono de oxígeno durante la contrarreloj. **PetO₂_{TT}:** valores medios de presión espirada final de oxígeno de oxígeno durante la contrarreloj. **POTENCIA_{TT}:** valores medios de vatios absolutos durante la contrarreloj. **POTENCIA_{TTTr}:** valores medios de vatios relativos durante la contrarreloj. **SpO₂:** saturación arterial de oxígeno. **TT10:** valores en el minuto 10 de la contrarreloj. **TT20:** valores en el minuto 20 de la contrarreloj. **VO₂_{rTT}:** valores medios de consumo

de oxígeno relativos a la masa corporal durante la contrarreloj. VO_2 : valores medios de consumo de oxígeno durante la contrarreloj.

WUP: valores en el calentamiento previo a la contrarreloj.

* $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** ≤ 0.001 diferencias significativas respecto a los valores en normoxia.

Con respecto a las correlaciones entre el porcentaje de diferencia en las variables medidas en el pre y post exposición a hipoxia/normoxia y los resultados obtenidos en la prueba contrarreloj simulada, no se obtuvo ninguna correlación significativa ni en la exposición a hipoxia ni en la exposición a normoxia.

Las asociaciones entre los resultados obtenidos en el momento post intervención y la prueba de contrarreloj tanto para la exposición a hipoxia como para la exposición a normoxia se exponen en la tabla 3.

Tabla 3. Correlaciones de variables post intervención y las variables de la prueba contrarreloj en la intervención a hipoxia y normoxia

Variable post	Variable en la contrarreloj	r	p
EXPOSICIÓN A HIPOXIA			
Glucosa	LACTATO _{DIF WUP-TT20}	0,888	0,001
	CR10 _{WUP}	0,812	0,008*
	CR10TT _{MEDIA}	0,723	0,028*
FC	EqO _{2 TT}	0,781	0,013*
	EqCO _{2 TT}	0,764	0,016*
VO ₂	VO _{2 TT}	0,802	0,009*
	POTENCIA _{TTf}	0,903	< 0,001***
VO _{2 f}	VO _{2 fTT}	0,675	0,046*
	POTENCIA _{TTf}	0,891	0,001**
EqO ₂	EqCO _{2 TT}	0,778	0,014*
PetO ₂	PetO _{2 TT}	0,884	0,002*
	PetCO _{2 TT}	-0,898	< 0,001***
PetCO ₂	PetO _{2 TT}	-0,753	0,019*
	PetCO _{2 TT}	0,770	0,015*
EXPOSICIÓN A NORMOXIA			
Glucosa	VO _{2 fTT}	0,726	0,027*
Lactato	EqO _{2 TT}	-0,680	0,044*
EqO ₂	EqCO _{2 TT}	0,778	0,014*
PetCO ₂	PetO _{2 TT}	-0,678	0,045*
	PetCO _{2 TT}	0,846	0,004**

CR10: valores de percepción del esfuerzo. DIF_WUP-TT20: diferencia entre valores WUP Y TT20. EqCO₂: valores medios de equivalente respiratorio de dióxido de carbono. EqO₂: valores medios de equivalente respiratorio de oxígeno. FC: frecuencia cardíaca. MEDIA: valor medio durante la contrarreloj. PetCO₂: valores medios de presión final espirada de dióxido de carbono. PetO₂: valores medios de presión final espirada de oxígeno. POTENCIA_{TT}: valores medios de vatios relativos durante la contrarreloj. TT20: valores en el minuto 20 de la contrarreloj. VO₂ r: valores medios de consumo de oxígeno relativo. VO₂: valores medios de consumo de oxígeno. WUP: valores en el calentamiento previo a la contrarreloj.

* p < 0,05, ** p < 0,01, *** p ≤ 0,001 correlación significativa.

DISCUSIÓN

El presente estudio trató de investigar los efectos de la hipoxia aguda en reposo observando si el rendimiento en contrarreloj en cicloergómetro, en normoxia, tras exposición a hipoxia aguda en reposo, se veía modificado. Si bien las variables de respuesta fisiológica y de rendimiento frente a la hipoxia han sido ampliamente descritas en situaciones de ejercicio¹⁶, en la literatura científica se encuentran resultados divergentes en cuanto a los cambios producidos frente a exposición a hipoxia aguda y su posible influencia en el rendimiento físico en normoxia³, y no encontramos aportaciones científicas que traten sobre la exposición a hipoxia en reposo y el posterior rendimiento aeróbico en ciclismo, en condiciones de normoxia. Se observaron modificaciones significativas entre los momentos pre y post en variables de intercambio gaseoso en condiciones de exposición a hipoxia, mientras que no se encontraron modificaciones en variables cardiorrespiratorias, metabólicas ni de rendimiento físico en la contrarreloj tras exposición a hipoxia aguda. A pesar de no darse modificaciones en variables en la contrarreloj, se encontró que, algunas de las variables de intercambio gaseoso con modificaciones tras exposición a hipoxia aguda guardan relación con variables de rendimiento durante la contrarreloj.

Correspondiendo con Loeppky et al. (1997)⁴³, los resultados del presente estudio muestran modificaciones en variables de intercambio gaseoso entre los momentos pre y post exposición a hipoxia (EqCO₂, PetO₂ y PetCO₂) y modificaciones de PetO₂ entre pre y post exposición a normoxia, cambios que además se corresponden en mayor medida con el grado de exposición a hipoxia²⁰. Comparando los momentos post entre normoxia e hipoxia se observaron modificaciones significativas en las variables VO₂ y VO₂ relativo⁴¹. Las modificaciones sobre PetCO₂ pueden clasificarse como un efecto “hipocápnico” (baja concentración de CO₂ en sangre), provocado por la hipoxia, similar al efecto descrito por Fatemian & Robbins, (1998)⁴². Estas modificaciones muestran cómo la exposición a hipoxia aguda tiene influencia en la disponibilidad de suministro de oxígeno a los tejidos³⁴, y con ello la modificación de variables metabólicas en condiciones de reposo⁴³. En el caso de este estudio, a pesar de realizar mediciones sobre variables metabólicas no se observaron diferencias significativas. Tras la presente investigación, se observa cómo se dan respuestas de intercambio gaseoso tras un periodo de exposición a hipoxia de 30 min., siendo un tiempo relativamente corto con respecto al resto de diseños metodológicos de los estudios disponibles en la bibliografía².

En la literatura científica se ha expuesto cómo la exposición a hipoxia prolongada en el tiempo tiene efectos sobre adaptaciones que mejoran el rendimiento en ciclismo ¹⁶. Sin embargo, no encontramos estudios que hayan analizado los efectos que tiene la exposición a hipoxia aguda, de forma puntual, en el rendimiento inmediato en contrarreloj en condiciones de normoxia. En los resultados de este estudio, las variables analizadas en la contrarreloj no sufrieron modificaciones bajo condiciones de exposición previa a hipoxia o normoxia, sin encontrar diferencias significativas en variables cardiorrespiratorias, metabólicas ni de rendimiento físico. Las variables con respuesta inmediata tras exposición aguda a hipoxia observadas anteriormente (momento post exposición) no mantuvieron diferencias significativas durante la contrarreloj, de manera que la respuesta cardiorrespiratoria en ejercicio en normoxia tras una exposición breve a hipoxia parece ser suficiente para hacer que se recupere el estado fisiológico inicial, anterior a la exposición a hipoxia ²⁰. A pesar de la influencia de la hipocapnia sobre variables de respuesta ventilatoria (O_2) durante el ejercicio ⁴⁴, y en esfuerzos cortos maximales (70 s) en ciclismo ⁴⁵, en el caso del presente estudio, el efecto de hipocapnia inducido por la hipoxia no mejora el rendimiento en ciclismo. Otros estudios han tratado de analizar los efectos de la hipocapnia en el rendimiento en contrarreloj prolongada en ciclismo (60-90 min.s) ⁴⁶, sin encontrar modificaciones aparentes, correspondiéndose las evidencias con los resultados del estudio. Así pues, analizando la influencia de mejora del rendimiento en normoxia mediante previa exposición a hipoxia aguda, con un tiempo de 30 min.s ($FiO_2=9\%$), no se observan mejoras en el rendimiento. Creemos que son necesarios más estudios con diseños metodológicos similares al presente, tratando con muestras más grandes, ciclistas de diferentes niveles o tiempos más prolongados de exposición-rendimiento físico, para tratar de clarificar si los efectos inmediatos de la hipoxia aguda afectan al rendimiento aeróbico en ciclismo. Además, en el presente trabajo se analizó la relación entre las respuestas fisiológicas provocadas por la hipoxia aguda en reposo y las variables fisiológicas de rendimiento en contrarreloj en ciclismo observándose que algunas de ellas guardaban relación. Las variables con correlaciones tras exposición a hipoxia aguda en reposo con variables de la contrarreloj en normoxia (glucosa en post con $LACTATO_{DIF_WUP-TT20}$), son similares a las evidencias recogidas ante exposición a hipoxia aguda y la modificación en utilización de sustratos energéticos en reposo de Lecoultre et al. (2013), aunque estos no trataron sobre las variables en ejercicio en condiciones de normoxia. La correlación entre glucosa en post y $LACTATO_{DIF_WUP-TT20}$ durante la contrarreloj simulada muestra, de nuevo, un cambio en la utilización de sustratos en el rendimiento en normoxia tras exposición a hipoxia y, aunque no encontramos evidencia hasta el momento con las mismas características del estudio, es posible sugerir un efecto inmediato tras la hipoxia aguda en la utilización de sustratos energéticos a nivel muscular. De forma similar, la relación entre glucosa en post con $CR10_{WUP}$ muestra una correlación entre la movilización de glucosa post exposición a hipoxia y el aumento de la percepción subjetiva del esfuerzo, lo cual puede venir inducido por una menor disponibilidad de energía endógena ⁴⁸, tras el incremento de glucosa en sangre arterial con la exposición a hipoxia. La asociación de FC en post con EqO_2_{TT} muestra una correlación entre la frecuencia cardíaca y la variable de equivalente ventilatorio de oxígeno ⁴⁹, representativa del coste metabólico durante el ejercicio tras haber sido sometido a condiciones de hipoxia, aunque son aportaciones propias del estudio, ya que no encontramos diseños de estudios similares para contrastar estas correlaciones. Se puede observar que la correlación entre VO_2 en post con VO_2_{TT} muestra

la relación entre el punto de partida del estado metabólico de consumo de oxígeno anterior al ejercicio y el consumo de oxígeno en ejercicio ⁵⁰, aunque no encontramos evidencia que trate de ver la misma respuesta tras haberse sometido a exposición de hipoxia aguda en reposo y rendimiento físico posterior en normoxia. Por último, encontramos correlación entre valores post de VO_2 y $POTENCIA_{TT}$ y VO_{2r} en post con VO_2_{TT} y $POTENCIA_{TT}$, guardando estas variables estrecha correlación con un mayor rendimiento en ciclismo en contrarreloj ²², aunque en el presente estudio no se hayan evidenciado mejoras. Es importante mencionar que por el momento no encontramos estudios en la bibliografía con diseño similar al nuestro relacionando las respuestas inducidas por la hipoxia aguda en reposo y el rendimiento en contrarreloj en normoxia en ciclismo pudiendo contrasta los resultados relacionales obtenidos.

A pesar de que el estudio se ha realizado con un alto rigor metodológico y científico, el presente estudio no está exento de limitaciones. En primer lugar, el tamaño muestral es reducido. Futuros estudios con muestras más grandes, diferentes niveles competitivos de los participantes, otros deportes y diseños con exposiciones a hipoxia más prolongadas en el tiempo pueden aportar información y conclusiones extrapolables al ámbito práctico del efecto de la hipoxia aguda sobre el rendimiento en normoxia. Además, no se han podido analizar variables biomecánicas como por ejemplo la fuerza de torque, cadencia...etc., por lo que pueden ser interesantes para analizar en futuros estudios. Por último, es necesario comentar las limitaciones de la prueba contrarreloj simulada, atendiendo al protocolo de realización escogido (hiperbólico). Pueden existir limitaciones en la capacidad de rendimiento de los sujetos en la prueba de contrarreloj en cicloergómetro, pudiendo venir originadas por el diseño de dicha prueba. Podría resultar interesante escoger diferentes contextos de realización de pruebas de rendimiento en contrarreloj, bien frente a protocolos de intensidades estables o condiciones de rendimiento similares a las condiciones reproducidas por los sujetos en competición.

CONCLUSIONES

La exposición a hipoxia aguda durante 30 min a una altitud simulada de 4500 msnm tiene influencia directa en la respuesta cardiorrespiratoria (variables de intercambio gaseoso) en reposo frente a condiciones de normoxia. Aunque se produce una respuesta aguda en variables de intercambio gaseoso tras exposición a hipoxia aguda en reposo, esta respuesta no afecta al rendimiento en contrarreloj simulada en ciclismo en normoxia. Por último, se encuentran correlaciones entre la respuesta a hipoxia en reposo y el rendimiento en contrarreloj simulada en normoxia en variables metabólicas, de respuesta ventilatoria y de esfuerzo percibido mostrando nuevos hallazgos en la respuesta a la hipoxia aguda en reposo y el rendimiento en normoxia en ciclismo no evidenciados hasta el momento en la literatura.

AGRADECIMIENTOS

El estudio se realizó bajo el amparo de la Facultad de Educación y Deporte de la Universidad del País Vasco (UPV/EHU). Agradecer el uso de instalaciones requeridas para el estudio, así como los instrumentos necesarios.

Agradecemos el apoyo a todos los participantes en el estudio mostrando su apoyo por el interés en el desarrollo del conocimiento científico en el ámbito del deporte gracias a su participación voluntaria en el estudio.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran la no existencia de conflicto de intereses.

BIBLIOGRAFÍA

1. Kellogg RH. La pression barométrique: Paul Bert's hypoxia theory and its critics. *Respiration Physiology*. 1978;34(1). doi:10.1016/0034-5687(78)90046-4
2. Wehrlin JP, Hallén J. Linear decrease in VO₂max and performance with increasing altitude in endurance athletes. *European Journal of Applied Physiology*. 2006;96(4). doi:10.1007/s00421-005-0081-9
3. Millet GP, Roels B, Schmitt L, Woorons X, Richalet JP. Combining hypoxic Methods for peak performance. *Sports Medicine*. 2010;40(1). doi:10.2165/11317920-000000000-00000
4. Gore CJ, Clark SA, Saunders PU. Nonhematological mechanisms of improved sea-level performance after hypoxic exposure. In: *Medicine and Science in Sports and Exercise*. Vol 39. ; 2007. doi:10.1249/mss.0b013e3180de49d3
5. Levine BD, Stray-Gundersen J. "Living high-training low": Effect of moderate-altitude acclimatization with low-altitude training on performance. *Journal of Applied Physiology*. 1997;83(1). doi:10.1152/jappl.1997.83.1.102
6. Rusko HK, Tikkanen HO, Peltonen JE. Altitude and endurance training. *Journal of Sports Sciences*. 2004;22(10). doi:10.1080/02640410400005933
7. Saunders PU, Garvican-Lewis LA, Schmidt WF, Gore CJ. Relationship between changes in haemoglobin mass and maximal oxygen uptake after hypoxic exposure. *British Journal of Sports Medicine*. 2013;47(SUPPL. 1). doi:10.1136/bjsports-2013-092841
8. Mattila V, Rusko H. EFFECT OF LIVING HIGH AND TRAINING LOW ON SEA LEVEL PERFORMANCE IN CYCLISTS928. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 1996;28(Supplement). doi:10.1097/00005768-199605001-00926
9. Gore CJ, Hahn AG, Aughey RJ, et al. Live high:train low increases muscle buffer capacity and submaximal cycling efficiency. *Acta Physiologica Scandinavica*. 2001;173(3). doi:10.1046/j.1365-201X.2001.00906.x
10. Sharma AP, Saunders PU, Garvican-Lewis LA, et al. Normobaric Hypoxia Reduces VO₂ at Different Intensities in Highly Trained Runners. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 2019;51(1). doi:10.1249/MSS.0000000000001745
11. Schmitt L, Willis SJ, Coulmy N, Millet GP. Effects of different training intensity distributions between elite cross-country skiers and nordic-combined athletes during live high-train low. *Frontiers in Physiology*. 2018;9(JUL). doi:10.3389/fphys.2018.00932
12. Flaherty G, O'Connor R, Johnston N. Altitude training for elite endurance athletes: A review for the travel medicine practitioner. *Travel Medicine and Infectious Disease*. 2016;14(3). doi:10.1016/j.tmaid.2016.03.015
13. Bailey DM. Physiological implications of altitude training for endurance performance at sea level: A review. *British Journal of Sports Medicine*. 1997;31(3). doi:10.1136/bjism.31.3.183

14. Mujika I, Sharma AP, Stellingwerff T. Contemporary Periodization of Altitude Training for Elite Endurance Athletes: A Narrative Review. *Sports Medicine*. 2019;49(11). doi:10.1007/s40279-019-01165-y
15. Wilber RL, Stray-Gundersen J, Levine BD. Effect of hypoxic “dose” on physiological responses and sea-level performance. In: *Medicine and Science in Sports and Exercise*. Vol 39. ; 2007. doi:10.1249/mss.0b013e3180de49bd
16. Hahn AG, Gore CJ. The effect of altitude on cycling performance: A challenge to traditional concepts. *Sports Medicine*. 2001;31(7). doi:10.2165/00007256-200131070-00008
17. Bernal García M, Cruz Rubio S. Interacción fisiológica de la hormona eritropoyetina, relacionada con el ejercicio físico en altitud moderada y alta. *Revista Investigación en Salud Universidad de Boyacá*. 2014;1(1). doi:10.24267/23897325.106
18. Billaut F, Gore CJ, Aughey RJ. Enhancing team-sport athlete performance: Is altitude training relevant? *Sports Medicine*. 2012;42(9). doi:10.2165/11634050-000000000-00000
19. Calbet JAL. Chronic hypoxia increases blood pressure and noradrenaline spillover in healthy humans. *Journal of Physiology*. 2003;551(1). doi:10.1113/jphysiol.2003.045112
20. Constantini K, Bouillet AC, Wiggins CC, Martin BJ, Chapman RF. Ventilatory Responsiveness during Exercise and Performance Impairment in Acute Hypoxia. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 2021;53(2). doi:10.1249/MSS.0000000000002466
21. Mekjavic IB, Debevec T, Amon M, Keramidas ME, Kounalakis SN. Intermittent normobaric hypoxic exposures at rest: Effects on performance in normoxia and hypoxia. *Aviation Space and Environmental Medicine*. 2012;83(10). doi:10.3357/ASEM.3332.2012
22. Borszcz FK, Tramontin AF, de Souza KM, Carminatti LJ, Costa VP. Physiological Correlations With Short, Medium, and Long Cycling Time-Trial Performance. *Research Quarterly for Exercise and Sport*. 2018;89(1). doi:10.1080/02701367.2017.1411578
23. McKay AKA, Stellingwerff T, Smith ES, et al. Defining Training and Performance Caliber: A Participant Classification Framework. *International Journal of Sports Physiology and Performance*. 2022;17(2). doi:10.1123/ijsp.2021-0451
24. Ernst DJ. *Procedures and Devices for the Collection of Diagnostic Capillary Blood Specimens; Approved Standard*. Vol 28.; 2004.
25. Yang ZW, Yang SH, Chen L, Qu J, Zhu J, Tang Z. Comparison of blood counts in venous, fingertip and arterial blood and their measurement variation. *Clinical and Laboratory Haematology*. 2001;23(3). doi:10.1046/j.1365-2257.2001.00388.x
26. Sachse D, Bolstad N, Jonsson M, et al. The accu-chek mobile blood glucose monitoring system used under controlled conditions meets ISO 15197 standards in the hands of diabetes patients. *Scandinavian Journal of Clinical and Laboratory Investigation*. 2012;72(5). doi:10.3109/00365513.2012.677544

27. Raa A, Sunde GA, Bolann B, et al. Validation of a point-of-care capillary lactate measuring device (Lactate Pro 2). *Scandinavian Journal of Trauma, Resuscitation and Emergency Medicine*. 2020;28(1). doi:10.1186/s13049-020-00776-z
28. Hanning CD, Alexander-Williams JM. Pulse oximetry: A practical review. *British Medical Journal*. 1995;311(7001).
29. Speer KE, Semple S, Naumovski N, McKune AJ. Measuring heart rate variability using commercially available devices in healthy children: A validity and reliability study. *European Journal of Investigation in Health, Psychology and Education*. 2020;10(1). doi:10.3390/ejihpe10010029
30. Gilgen-Ammann R, Schweizer T, Wyss T. RR interval signal quality of a heart rate monitor and an ECG Holter at rest and during exercise. *European Journal of Applied Physiology*. 2019;119(7). doi:10.1007/s00421-019-04142-5
31. Navalta JW, Tanner EA, Bodell NG. Acute normobaric hypoxia exposure and excess post-exercise oxygen consumption. *Aerospace Medicine and Human Performance*. 2018;89(12). doi:10.3357/AMHP.5162.2018
32. Wilber RL. Current trends in altitude training. *Sports Medicine*. 2001;31(4). doi:10.2165/00007256-200131040-00002
33. Larsen I, Welde B, Martins C, Tjønnå AE. High- and moderate-intensity aerobic exercise and excess post-exercise oxygen consumption in men with metabolic syndrome. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*. 2014;24(3). doi:10.1111/sms.12132
34. Costello JT, Bhogal AS, Williams TB, et al. Effects of Normobaric Hypoxia on Oxygen Saturation Variability. *High Altitude Medicine and Biology*. 2020;21(1). doi:10.1089/ham.2019.0092
35. Driller M. The reliability of a 30-minute performance test on a Lode cycle ergometer. *Journal of Science and Cycling*. 2012;1(2).
36. Bentley DJ, McNaughton LR, Thompson D, Vleck VE, Batterham AM. Peak power output, the lactate threshold, and time trial performance in cyclists. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 2001;33(12). doi:10.1097/00005768-200112000-00016
37. Faria EW, Parker DL, Faria IE. The science of cycling: Physiology and training - Part 1. *Sports Medicine*. 2005;35(4). doi:10.2165/00007256-200535040-00002
38. Borg G, Löllgen H. Borg's perceived exertion and pain scales. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*. 2001;52(9). doi:10.1249/00005768-199809000-00018
39. Cohen J. Statistical power analysis for the behavioural sciences. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates. Published online 1988.
40. McDonald JH. Statistics. Handbook of Biological Statistics 3rd Ed. *Handbook of biological statistics*. 2014;3rd edition.
41. Kayser B, Verges S. Hypoxia, Energy Balance And Obesity: From Pathophysiological Mechanisms To New Treatment Strategies. *Obesity Reviews*. 2013;14(7). doi:10.1111/obr.12034

42. Fatemian M, Robbins PA. Human ventilatory response to CO₂ after 8 h of isocapnic or poikilocapnic hypoxia. *Journal of Applied Physiology*. 1998;85(5). doi:10.1152/jappl.1998.85.5.1922
43. Parolin ML, Spriet LL, Hultman E, Hollidge-Horvat MG, Jones NL, Heigenhauser GJF. Regulation of glycogen phosphorylase and PDH during exercise in human skeletal muscle during hypoxia. *American Journal of Physiology - Endocrinology and Metabolism*. 2000;278(3 41-3). doi:10.1152/ajpendo.2000.278.3.e522
44. Chin LMK, Leigh RJ, Heigenhauser GJF, Rossiter HB, Paterson DH, Kowalchuk JM. Hyperventilation-induced hypocapnic alkalosis slows the adaptation of pulmonary O₂ uptake during the transition to moderate-intensity exercise. *Journal of Physiology*. 2007;583(1). doi:10.1113/jphysiol.2007.132837
45. Thomas C, Delfour-Peyrethon R, Bishop DJ, et al. Effects of pre-exercise alkalosis on the decrease in V̇O₂ at the end of all-out exercise. *European Journal of Applied Physiology*. 2016;116(1). doi:10.1007/s00421-015-3239-0
46. Bentley DJ, Vleck VE, Millet GP. The isocapnic buffering phase and mechanical efficiency: Relationship to cycle time trial performance of short and long duration. *Canadian Journal of Applied Physiology*. 2005;30(1). doi:10.1139/h05-104
47. Lecoultre V, Peterson CM, Covington JD, et al. Ten nights of moderate hypoxia improves insulin sensitivity in obese humans. *Diabetes Care*. 2013;36(12). doi:10.2337/dc13-1350
48. Burgess ML, Robertson RJ, Davis JM, Norris JM. RPE, blood glucose, and carbohydrate oxidation during exercise: Effects of glucose feedings. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 1991;23(3).
49. Moon JK, Butte NF. Combined heart rate and activity improve estimates of oxygen consumption and carbon dioxide production rates. *Journal of Applied Physiology*. 1996;81(4). doi:10.1152/jappl.1996.81.4.1754
50. Hughson RL, Morrissey MA. Delayed kinetics of VO₂ in the transition from prior exercise. Evidence for O₂ transport limitation of VO₂ kinetics: A review. *International Journal of Sports Medicine*. 1983;4(1). doi:10.1055/s-2008-1026013

ANEXOS

Anexo 1. Consentimiento informado para los participantes.

ESTUDIO, HIPOXIA EN REPOSO Y RENDIMIENTO EN CICLISMO



Objeto del estudio

Conocer la influencia de la hipoxia (exposición a aire empobrecido en oxígeno) en el rendimiento en ciclismo.

Participación

Asegurar la participación en 2 sesiones (dos semanas seguidas): para participar en el estudio es necesario poder asistir a **2 sesiones (duración aproximada 1,5 h/sesión) por determinar el día y hora con el investigador entre Marzo y Abril.**

Es necesario poder “llegar” descansado el día del estudio, al menos no habiendo realizado actividad intensa 48 horas antes, para llegar “descansado” el día de la prueba.

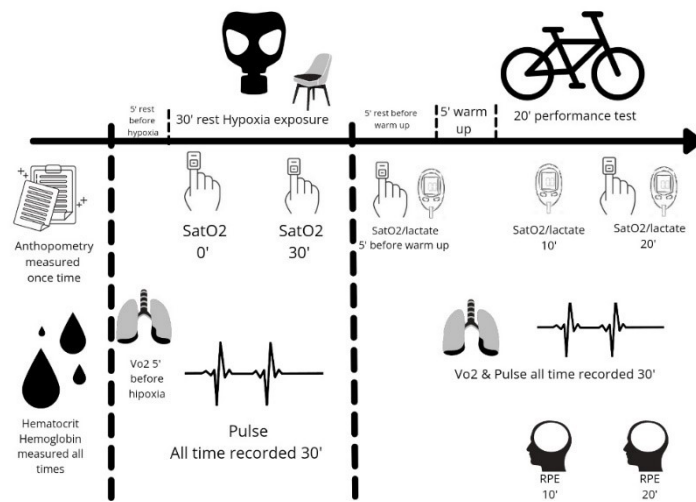
Fechas: comprendidas entre Marzo y abril. Dos sesiones distribuidas (una sesión por semana).

INFORMACIÓN para el test

- ✓ **Descansar al menos 48 horas antes, sin esfuerzos de alta intensidad o prolongados, recomendable: activación 24 h antes con rutina habitual precompetitiva.**
- ✓ **No consumir alcohol 48 horas antes.**
- ✓ **Necesario saber valores de FTP/UPF, para el desarrollo del estudio.**
- ✓ **Necesario saber medidas de bici: altura sillín desde centro de pedalier a sillín, alcance punta sillín a manillar.**
- ✓ **Llevar Zapatillas de “pedales automáticos BTT, sistema SPD”, de no disponer de sistema SPD pueden traerse pedales propios.**
- ✓ **Culotte & maillote.**
- ✓ **Ropa de aseo para ducha (opcional).**

Métodos en el test

- Valoración hematológica: Hematocrito/hemoglobina.
- Valoración de lactato en reposo y en ejercicio.
- Exposición a hipoxia: 4500 m.s.n.m.
- Valoración de consumo de oxígeno en test de contrarreloj en bicicleta (20’).



Procedimiento del test

Consentimiento informado

El estudio “HIPOXIA EN REPOSO Y RENDIMIENTO EN CICLISMO” consta de la participación del sujeto; exposición a hipoxia, posteriormente medición del rendimiento en una contrarreloj simulada de 20’.

En el proceso de investigación del estudio se recogen datos personales antropométricos; peso y altura, además de realizar procesos de valoración hematológica: hematocrito, lactato, y valores de rendimiento funciona sobre cicloergómetro con mediciones de: potencia, consumo de oxígeno, frecuencia cardíaca.

LOS RESULTADOS RECOGIDOS EN EL TEST SERÁN APORTADOS AL PARTICIPANTE TRAS FINALIZAR LA INVESTIGACIÓN.

EN NINGÚN MOMENTO APARECERÁN LOS DATOS RECOGIDOS DE MANERA PÚBLICA, NI CON VARIABLES QUE PERMITAN LA IDENTIFICACIÓN DE LOS PARTICIPANTES.

Los posibles riesgos en la realización del estudio son la exposición a hipoxia en reposo la cual lleva a una bajada de la saturación de la hemoglobina (controlada por el investigador) siendo esta exposición el estímulo hipóxico (similar a estancia en altura 4500 msnm), para posteriormente realizar una prueba contrarreloj en cicloergómetro, entendiéndose la necesidad de esfuerzo físico máximo por parte del participante en esta prueba.

Comprendo los procesos y métodos descritos y consiento mi participación en el estudio: en Vitoria Gasteiz a

.....
(Firma)


Anexo 2. Hoja de registro en laboratorio de variables recogidas por los investigadores.

SUJETO/CÓDIGO	

ANTROPOMETRÍA (NOMBRE FICHERO)	ALTURA	PESO
HEMATOCRITO		
HEMOGLOBINA		
GLUCOSA		
FTP DECLARADO		
Nº HORAS ENTRENO SEMANALES (MEDIA STRAVA)		

COLOCAR MASCARA VO2 + CINTA PULSO + HUMON : 5´REPOSO+ 5´MEDICIONES VO2, VFC, SpO2, LACTATO

VO2 BASAL (NOMBRE FICHERO) VALOR MEDIO	
VARIABILIDAD FC (NOMBRE FICHERO)	
SpO2	
LACTATO	



30´EXPOSICIÓN HIPOXIA

	0´	10´	20´	30´
SpO2				
Pulso				

5´ EN REPOSO, MEDICIONES VO2, VFC, LACTATO, SPO2(FINAL MINUTO 5).

VO2 (NOMBRE FICHERO)	
VFC (NOMBRE FICHERO)	
LACTATO	

GLUCOSA	
SPo2 FINAL MIN 5	

CALENTAMIENTO 5' + TEST 20'

(CHECK: VO2, Fc, humon)

Comenzar actividad Garmin: 5' calent + test comienza en minuto ___ de VO2, minuto ___ de Garmin.

INFORMAR CADA SI NECESITA SUBIR O BAJAR POTENCIA

REALIZAR LAP MIN 10,20 Y DETENER FIN EPOC

	MIN 5 CALENTAM	10'	20'
VO2 (NOMBRE FICHERO)			
FC			
SpO2			
SpO2 MUSCULAR			
LACTATO			
GLUCOSA			
CR10			

SOBRE LA BICICLETA, EN REPOSO medición en min 5 de

FC SpO2, Lactato, Glucosa

5' REPOSO VO2 (O REGRESO A NIVELES BASAL)	
FC AL FINAL DE VO2 BASAL	
SpO2	
SpO2 MUSCULAR	
LACTATO	
GLUCOSA	

