

OPEN  ACCESS

# Coordinación cardiorrespiratoria durante la recuperación tras el ejercicio: un indicador novedoso para evaluar la salud

Óscar Abenza<sup>1,2</sup> , Lluc Montull<sup>3\*</sup> , Casimiro Javierre<sup>4</sup>  y Natàlia Balagué<sup>2</sup> <sup>1</sup> Facultad de Medicina y Ciencias de la Salud, Universidad de Barcelona, Barcelona (España).<sup>2</sup> Grupo de Investigación en Sistemas Complejos y Deporte, Instituto Nacional de Educación Física de Cataluña (INEFC), Universidad de Barcelona (UB), Barcelona (España).<sup>3</sup> Grupo de Investigación en Sistemas Complejos y Deporte, Instituto Nacional de Educación Física de Cataluña (INEFC), Universidad de Lleida (UdL), La Seu d'Urgell (España).<sup>4</sup> Departamento de Ciencias Fisiológicas, Universidad de Barcelona (UB), Barcelona (España).**Citación**

Abenza, Ó., Montull, L., Javierre, C. & Balagué, N. (2024). Cardiorespiratory coordination during exercise recovery: a novel measure for health assessment. *Apunts Educación Física y Deportes*, 159, 1-9. [https://doi.org/10.5672/apunts.2014-0983.es.\(2025/1\).159.01](https://doi.org/10.5672/apunts.2014-0983.es.(2025/1).159.01)

**Resumen**

La coordinación cardiorrespiratoria (CCR), variable biológica recientemente identificada que evalúa la interacción entre los parámetros derivados de las pruebas de esfuerzo cardiopulmonar (PECP), ha demostrado una elevada sensibilidad a los efectos del entrenamiento y a los trastornos funcionales. Dado el papel crítico de la recuperación tras el ejercicio en la detección de desregulaciones funcionales, este estudio tiene como objetivo explorar la CCR durante la recuperación tras el ejercicio en personas adultas sanas y físicamente inactivas. Quince participantes se sometieron a una PECP piramidal realizando cargas de trabajo idénticas (en orden inverso) durante las fases de intensidad creciente y de recuperación (de intensidad decreciente). Se llevó a cabo un análisis de los componentes principales de las variables cardiorrespiratorias seleccionadas para evaluar la CCR. Asimismo, se calcularon el valor propio del primer componente principal y la entropía informativa. Los participantes se clasificaron en función de si presentaban uno o dos componentes principales (grupos 1CP y 2CP) durante la fase de recuperación de la PECP. Los resultados revelaron que: a) la CCR fue mayor durante la fase de recuperación que durante la fase de intensidad creciente ( $t = -2.67$ ;  $p < .01$ ;  $d = -0.72$ ); b) el grupo 1CP mostró valores propios más altos ( $t = 3.756$ ;  $p < .01$ ;  $d = 2.09$ ) y menor entropía informativa ( $U = 0.00$ ;  $p < .01$ ;  $d = 15.83$ ) que el grupo 2CP; y c) el grupo 1CP tuvo una frecuencia cardiaca, una ventilación y una valoración del esfuerzo percibido al final de la fase de recuperación inferiores a las del grupo 2CP ( $d = 1.21$ ;  $d = 0.57$ ;  $d = 0.71$ ; respectivamente). En conclusión, la CCR aumentó durante la recuperación tras el ejercicio, y los participantes con menos componentes principales en la fase de recuperación mostraron una mayor eficiencia cardiorrespiratoria y una mejor forma física.

**Palabras clave:** análisis de componentes principales, capacidad cardiorrespiratoria, ejercicio piramidal a intensidad submáxima, entropía, fisiología en red del ejercicio, prueba de esfuerzo.

**Portada:**  
Laura Kluge compite en un duelo por el puck en el partido entre Alemania y Hungría durante la Eishockey Deutschland Cup, en Landshut, Alemania, el 9 de noviembre de 2024.  
© IMAGO/ActionPictures/  
lafototeca.com

## Introducción

La prueba de esfuerzo cardiopulmonar (PECP) se aplica ampliamente en la praxis clínica para evaluar la reserva cardíaca y la capacidad cardiorrespiratoria de todo tipo de grupos demográficos (Balady et al., 2010). Sin embargo, las variables fisiológicas aisladas (por ejemplo, la frecuencia cardíaca [FC], el volumen respiratorio por minuto [VRP], el consumo de oxígeno [ $VO_2$ ], etc.) y los parámetros relacionados (por ejemplo, el umbral ventilatorio, la relación de intercambio respiratorio, etc.) apenas informan sobre la coordinación dinámica de la función cardiorrespiratoria durante el ejercicio (Balagué et al., 2016; Garcia-Retortillo et al., 2017).

La coordinación cardiorrespiratoria (CCR), propuesta como variable para medir las interacciones entre parámetros derivados de las PECP, ha sido muy útil para detectar de forma sensible las diferencias entre varios factores, tales como ejercicios a intensidad máxima repetidos (Garcia-Retortillo et al., 2017), grupos demográficos diversos con y sin alteraciones cromosómicas (Oviedo et al., 2021), niveles de entrenamiento hipóxico (Krivoshchekov et al., 2021), planes de entrenamiento diferentes (Balagué et al., 2016; Garcia-Retortillo et al., 2019) y manipulaciones dietéticas (Esquius et al., 2022). Sin embargo, aún están por explorar en gran parte sus posibilidades de comprobación y diagnóstico en los ámbitos médico y deportivo.

La CCR se ha evaluado habitualmente mediante el análisis de componentes principales (ACP), técnica que identifica los patrones de covariación subyacentes entre los datos de series temporales de diferentes variables cardiorrespiratorias (Balagué et al., 2016). Cuando las variables comparten una covariación baja, aumenta el número de componentes principales (CP), y viceversa. Los CP plasman la variabilidad compartida entre estas variables en orden decreciente de importancia. Por lo tanto, el primer componente principal ( $CP_1$ ) representa la máxima covariación entre variables y se considera la variable de coordinación, mientras que cada uno de los siguientes componentes ( $CP_2$ ,  $CP_3$ , etc.) recoge una varianza compartida progresivamente inferior (Balagué et al., 2016). El número total de CP refleja el nivel de coordinación entre las variables cardiorrespiratorias estudiadas, por lo que un número menor de CP sugiere una coordinación más eficiente (Balagué et al., 2016). Por el contrario, un aumento del número de CP puede indicar la formación de nuevos patrones coordinativos (Haken, 2000) y, por tanto, una menor eficiencia. Se ha demostrado que esta menor eficiencia se debe a la acumulación de esfuerzo (Garcia-Retortillo et al., 2017; Garcia-Retortillo et al., 2019), los trastornos cardiorrespiratorios (Oviedo et al., 2021) y los efectos del entrenamiento hipóxico (Krivoshchekov et al., 2021).

Como complemento del ACP, el índice de entropía informativa sirve de herramienta para evaluar la complejidad de los estados de coordinación dentro del sistema (Seely y Macklem, 2012). Una mayor entropía indica un estado más desordenado del sistema, por lo que se necesita una mayor cantidad de información para describir su estado actual.

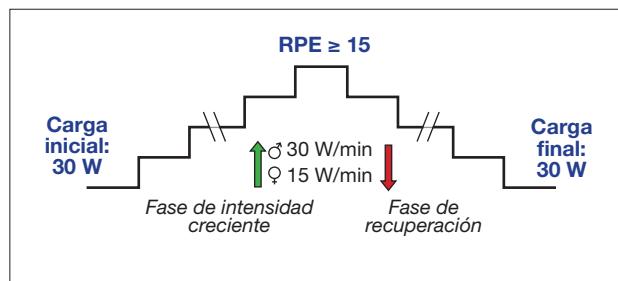
Por el contrario, a medida que el sistema se estabiliza en menos estados, su entropía disminuye (Naudts, 2005). La sensibilidad de la CCR a los efectos de la acumulación de esfuerzo y a la sobrecarga general parece ofrecer información más relevante sobre la carga interna en comparación con variables comúnmente utilizadas como la carga de trabajo máxima o el consumo máximo de oxígeno (Balagué et al., 2016; Garcia-Retortillo et al., 2017).

Los protocolos de PECP suelen incluir ejercicios de intensidad creciente y máxima con períodos de descanso cortos (de 3 a 10 minutos) o fases de recuperación activa a intensidad submáxima con una carga de trabajo constante. Sin embargo, la evaluación del periodo de recuperación tras el ejercicio contiene información crucial sobre la adaptabilidad de los sistemas reguladores durante el ejercicio. La recuperación tras el ejercicio representa una fase dinámica en la que diversos mecanismos activos tratan de volver a sus estados iniciales (Bartels et al., 2018; Romero et al., 2017). El aparato cardiovascular, concretamente, asume un papel clave en la redistribución de la sangre para satisfacer la demanda de energía y oxígeno que existe en cada momento, y lograr una pronta regulación tras el ejercicio es fundamental para la salud cardiovascular (Pocock et al., 2013). Por lo tanto, la recuperación tras el ejercicio puede considerarse una fase determinante para detectar disfunciones de coordinación entre los aparatos cardiovascular y respiratorio.

Un protocolo de ejercicio piramidal (véase la Figura 1), que implica cargas de trabajo progresivamente crecientes y luego simétricamente decrecientes, puede revelar una posible desregulación de las funciones cardiorrespiratorias. La reducción gradual de la intensidad podría proporcionar indicadores sensibles de la eficacia de la recuperación y la eficiencia del aparato cardiorrespiratorio. Si bien todavía no se ha empleado un protocolo de ejercicio piramidal para evaluar la CCR, este resulta especialmente valioso para comparar las respuestas cardiorrespiratorias con la misma carga de trabajo entre la fase de intensidad creciente y la de recuperación (decreciente). En consecuencia, permite evaluar la recuperación tras el ejercicio después de someterse a cargas de trabajo cada vez mayores (Montull et al., 2020).

**Figura 1**

Protocolo de ejercicio piramidal en bicicleta estática con cargas de trabajo (CT) progresivamente crecientes y decrecientes a modo de espejo simétrico. Adaptado de Montull et al. (2020), con permiso.



Este estudio tenía por meta explorar el potencial de evaluación de la CCR durante la recuperación tras el ejercicio utilizando un protocolo piramidal a intensidad submáxima para evaluar la capacidad cardiorrespiratoria de personas adultas sanas y físicamente inactivas. Nuestra hipótesis era que la fase de recuperación presentaría un número reducido de CP y una entropía informativa menor en comparación con la fase de intensidad creciente. Además, se preveía que las personas con una menor capacidad cardiorrespiratoria mostraran un mayor número de CP, una mayor entropía informativa y una peor recuperación psicobiológica durante la fase de recuperación.

## Metodología

### Participantes

Quince personas sanas pero inactivas (menos de 30 min de actividad física diaria) (siete hombres y ocho mujeres:  $53.07 \pm 3.31$  años;  $169.27 \pm 13.26$  cm;  $80.24 \pm 13.26$  kg; y con IMC de  $28.43 \pm 6.57$   $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ) participaron voluntariamente en el estudio. Mediante un análisis de potencia con G\*Power 3.1 (Faul et al., 2007) para determinar el tamaño de la muestra, y teniendo en cuenta los grandes tamaños del efecto de la CCR durante el ejercicio (Balagué et al., 2016), estimamos un tamaño de muestra de 12 participantes ( $d = 1$ ,  $\alpha < .05$ , potencia ( $1-\beta$ ) = .80).

Los criterios de exclusión fueron los siguientes: (a) enfermedades cardiovasculares; (b) contraindicaciones para el ejercicio; y (c) uso de medicamentos que pudieran influir en la respuesta de la FC al ejercicio. Tras compartir la información sobre los procedimientos del estudio, los participantes firmaron un consentimiento informado antes de la intervención. Los procedimientos experimentales fueron aprobados por el Comité de ética de investigación clínica del deporte de la Generalitat de Catalunya (ref. 07/2015/CEICEGC) y se llevó a cabo de acuerdo con la Declaración de Helsinki.

### Procedimientos

Se aplicó un protocolo de ejercicio piramidal utilizando un cicloergómetro (Excalibur, Lode, Groningen, Países Bajos) (véase la Figura 1). Tras un calentamiento en bicicleta a 30 W, la carga de trabajo se incrementó en 30 W/min (hombres) y en 15 W/min (mujeres), hasta que los participantes informaron de una percepción subjetiva del esfuerzo (RPE, por sus siglas en inglés)  $\geq 15$  (duro) en la escala de Borg de 6 a 20. En este punto, la carga de trabajo se redujo de forma inversa hasta los 30 W. La frecuencia de pedaleo se mantuvo siempre a 70 rpm. Se dieron a conocer a los participantes los procedimientos de prueba y la escala RPE (de 6 a 20) (Borg, 1998) durante

ejercicios de intensidad creciente submáxima en al menos dos ocasiones durante el mes previo al experimento.

### Obtención de datos

Durante la prueba, los participantes respiraron a través de una válvula (Hans Rudolph, 2700. Kansas City, MO, EE. UU.) y se determinó el intercambio de gases respiratorios mediante un sistema automatizado de circuito abierto (Metasys, Brainware, La Valette, Francia). Se registró el contenido de oxígeno ( $\text{O}_2$ ), el contenido de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y el caudal de aire respiración a respiración. Simultáneamente, el sistema Metasys registró la FC durante el mismo periodo. Antes de cada ensayo, se calibró el sistema utilizando una mezcla de composición conocida de  $\text{O}_2$  y  $\text{CO}_2$  (15 % de  $\text{O}_2$ , 5 % de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$  equilibrado) (Carburos Metálicos, Barcelona, España) y aire ambiental. Los participantes fueron supervisados de forma continua mediante un electrocardiograma de 12 derivaciones (CardioScan v.4.0. DM Software, Stateline, Nevada, EE. UU.).

Las pruebas se llevaron a cabo en un laboratorio bien ventilado con una temperatura ambiente de 23 °C y una humedad relativa del 48 %, con variaciones mínimas de no más de 1 °C en la temperatura y de un 10 % en la humedad relativa. Los participantes realizaron la prueba al menos 3 h después de una comida ligera y sin practicar actividades físicas intensivas en las 72 h previas al experimento (Balagué et al., 2016).

### Análisis de los datos

En primer lugar, las series de datos de las variables cardiorrespiratorias seleccionadas (fracción de oxígeno espirado “ $\text{FeO}_2$ ”, fracción de dióxido de carbono espirado “ $\text{FeCO}_2$ ”, FC y VRP) se dividieron en dos fases: de intensidad creciente y de recuperación. Se excluyeron del análisis otras variables cardiorrespiratorias comúnmente utilizadas en PECP (por ejemplo, la relación de intercambio respiratorio, el pulso de oxígeno, el  $\text{VO}_2$ , el volumen sistólico, etc.) debido a su relación matemática con las variables anteriores (Balagué et al., 2016).

#### *Análisis de los componentes principales*

A continuación, se llevó a cabo un ACP con las variables cardiorrespiratorias seleccionadas para cada fase. Antes de realizar el ACP, se calcularon la prueba de esfericidad de Barlett y el índice Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) de cada participante para evaluar la idoneidad de aplicar el ACP (Jolliffe, 2002). El número de CP se determinó utilizando el criterio de Kaiser-Guttmann, tratando los CP con valores propios  $\lambda \geq 1.00$  como significativos (Jolliffe, 2002). La solución de eficiencia óptima de los CP extraídos se obtuvo mediante rotación ortogonal Varimax (Meglen, 1991).

Dado el interés en estudiar la CCR durante la recuperación tras el ejercicio, se distinguieron dos grupos en función del número de CP en la fase de recuperación: participantes con 1 CP (grupo 1CP;  $n = 6$ ) y participantes con 2 CP (grupo 2CP;  $n = 9$ ).

#### *Análisis de la entropía informativa*

Para cuantificar el grado de coordinación entre los subsistemas cardiorrespiratorios implicados de cada participante durante ambas fases, se calculó el índice de entropía informativa de la siguiente manera:

$$H \pm \sum [1/2 \ln (\lambda) + 1/2 \ln (\pi) + 1/2]$$

Donde  $H$  es la entropía informativa del sistema,  $\lambda$  es el valor propio del CP y  $\pi$  es el número de Ludolph. Esta suma incluía todos los valores propios de las PECP (por ejemplo, en una prueba con 2 CP, la suma se realizaba sobre dos valores propios pertenecientes al CP<sub>1</sub> y al CP<sub>2</sub>, respectivamente).

#### *Comparación de las fases de intensidad creciente y de recuperación*

Para comparar los valores propios del CP<sub>1</sub> y la entropía informativa entre las fases de intensidad creciente y de recuperación de la prueba, se utilizaron la prueba U de Mann-Whitney y la prueba t pareada, respectivamente. Se eligió el CP<sub>1</sub> porque contenía la mayor proporción de varianza de los datos. Asimismo, se evaluaron las diferencias de los resultados entre los grupos 1CP y 2CP durante la fase de recuperación mediante la prueba U de Mann-Whitney y la prueba t independiente, respectivamente. Las diferencias estandarizadas se demostraron mediante la prueba  $d$  de Cohen, considerando tamaños del efecto medianos y grandes ( $d \geq 0.5$  y  $d \geq 0.8$ , respectivamente; Cohen, 1988).

#### *Proyecciones ortogonales del CP, durante la fase de recuperación entre los grupos 1CP y 2CP*

Se realizó una comparación de las proyecciones del CP<sub>1</sub> de todas las variables entre los grupos 1CP y 2CP durante la fase de recuperación mediante la prueba U de Mann-Whitney y los tamaños del efecto ( $d$  de Cohen).

#### *Eficacia de la recuperación psicobiológica y rendimiento entre los grupos 1CP y 2CP*

Los valores de FC, VRP, VO<sub>2</sub> y RPE al final de la fase de recuperación y de toda la prueba se compararon entre los grupos 1CP y 2CP mediante la prueba de Mann-Whitney y los tamaños del efecto ( $d$  de Cohen).

Todos los análisis estadísticos se realizaron mediante RStudio (RStudio, Inc., 2023), y el nivel de significación predeterminado se fijó en  $p < .05$ .

## Resultados

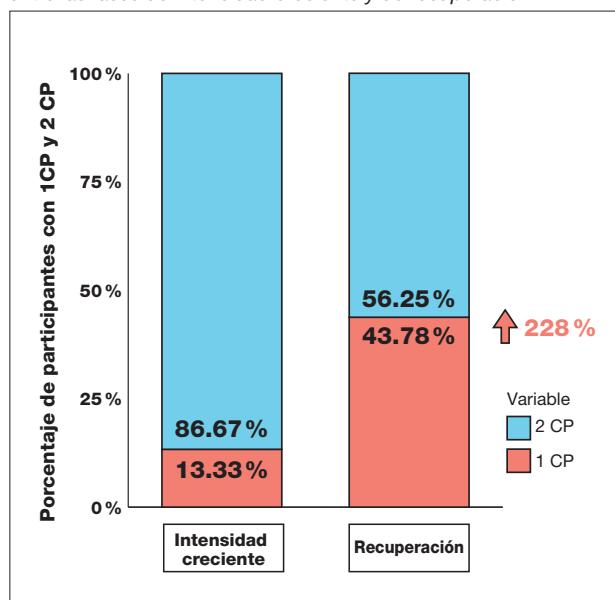
### *El ACP y la entropía informativa de variables cardiorrespiratorias durante las fases de intensidad creciente y de recuperación*

La prueba de esfericidad de Barlett presentó un resultado muy significativo ( $p < .001$ ), lo que confirma la idoneidad de los datos del ACP. El índice Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) mostró una adecuación satisfactoria del muestreo, tanto en la fase de intensidad creciente ( $0.60 \pm 0.07$ ) como en la fase de recuperación para ambos grupos: 1CP ( $0.69 \pm 0.06$ ) y 2CP ( $0.52 \pm 0.07$ ).

Durante la fase de recuperación, el porcentaje de participantes que mostraron 1 CP evidenció un aumento del 228 % en comparación con la fase de intensidad creciente, tal como se muestra en la Figura 2.

**Figura 2**

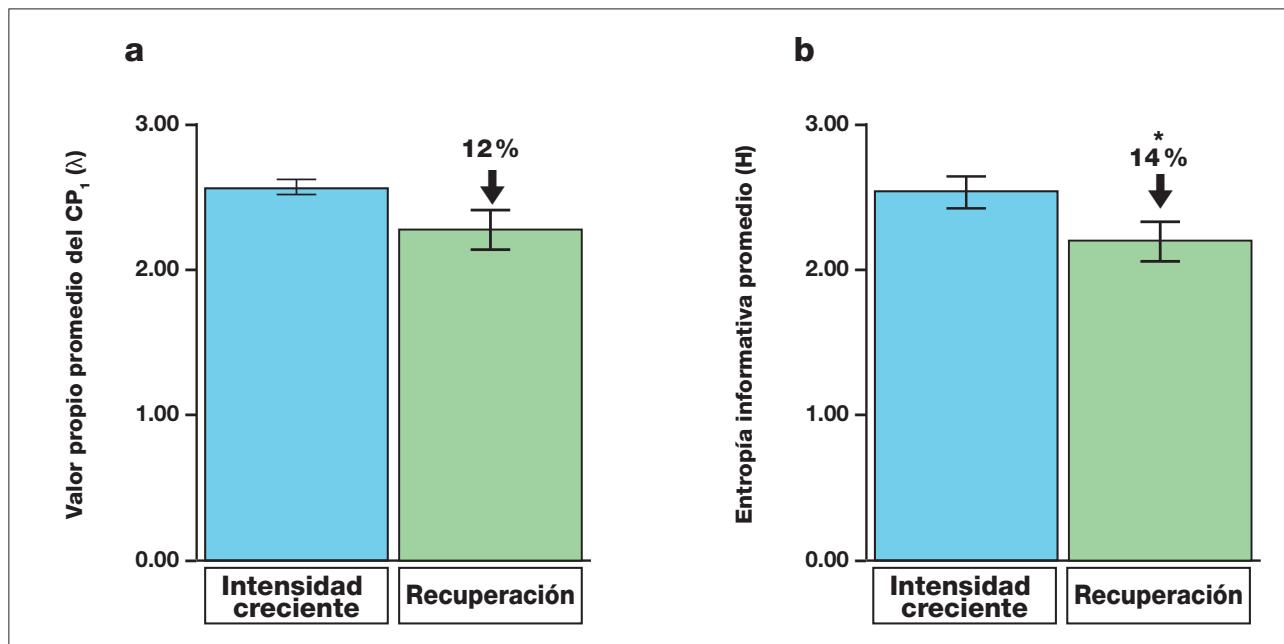
Porcentaje de participantes con uno y dos componentes principales entre las fases de intensidad creciente y de recuperación.



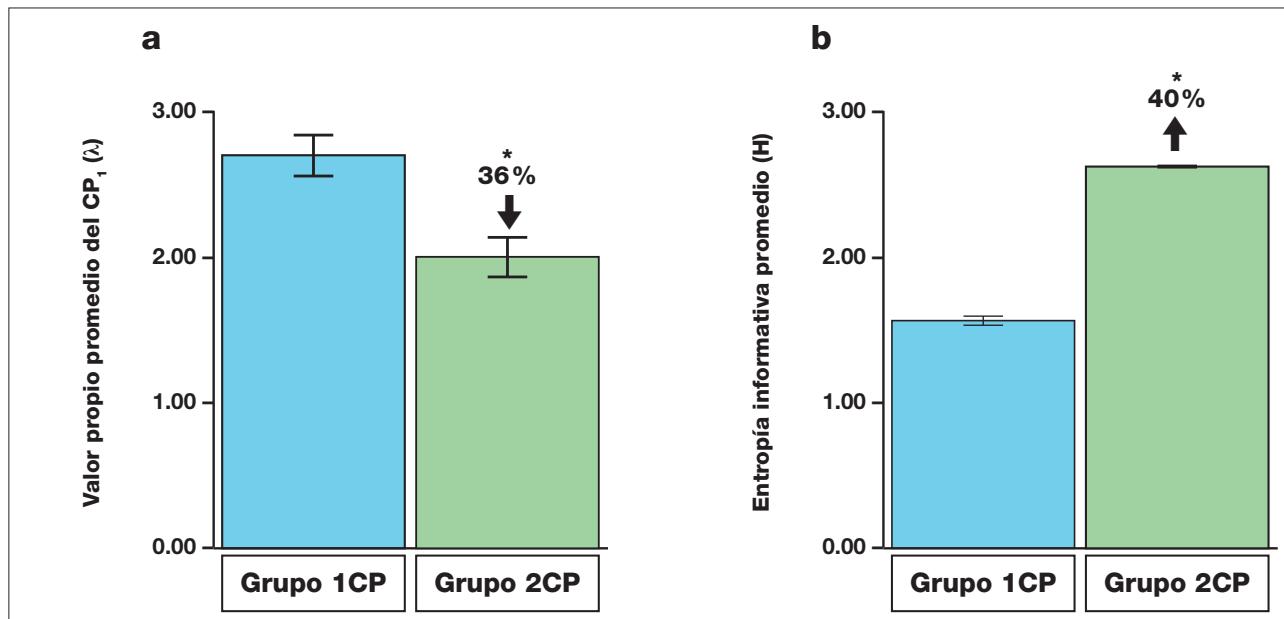
La Figura 3 ilustra que los valores propios del CP<sub>1</sub>, los cuales representan la parte predominante de la varianza de los datos, fueron ligeramente mayores en la fase de incremento ( $2.57 \pm 0.18$ ) que en la fase de recuperación ( $2.28 \pm 0.51$ ) ( $d = -0.76$ ). La entropía informativa también fue significativamente mayor durante la fase de intensidad creciente ( $2.54 \pm 0.39$ ) en comparación con la fase de recuperación ( $2.20 \pm 0.54$ ) ( $t = -2.67$ ;  $p < .01$ ;  $d = -0.72$ ).

**Figura 3**

Comparación (a) del valor promedio del  $CP_1$  ( $\lambda$ ) y (b) de la entropía informativa promedio ( $H$ ) entre las fases de intensidad creciente y de recuperación (\* $p < .05$ ).

**Figura 4**

Comparación (a) del valor promedio del  $CP_1$  ( $\lambda$ ) y (b) de la entropía informativa promedio ( $H$ ) entre los grupos 1CP y 2CP durante la fase de recuperación (\* $p < .05$ ).



Al comparar los dos grupos dentro de la fase de recuperación, los valores propios del  $CP_1$  fueron significativamente mayores en el grupo 1CP ( $2.71 \pm 0.32$ ) en comparación con el grupo 2CP ( $1.99 \pm 0.39$ ) ( $t = 3.756$ ;

$p < .01$ ;  $d = 2.09$ ). En la misma fase, el grupo 1CP mostró una entropía informativa notablemente inferior ( $1.57 \pm 0.06$ ) a la del grupo 2CP ( $2.62 \pm 0.07$ ) ( $U = 0.00$ ;  $p < .01$ ;  $d = 15.83$ ) (véase la Figura 4).

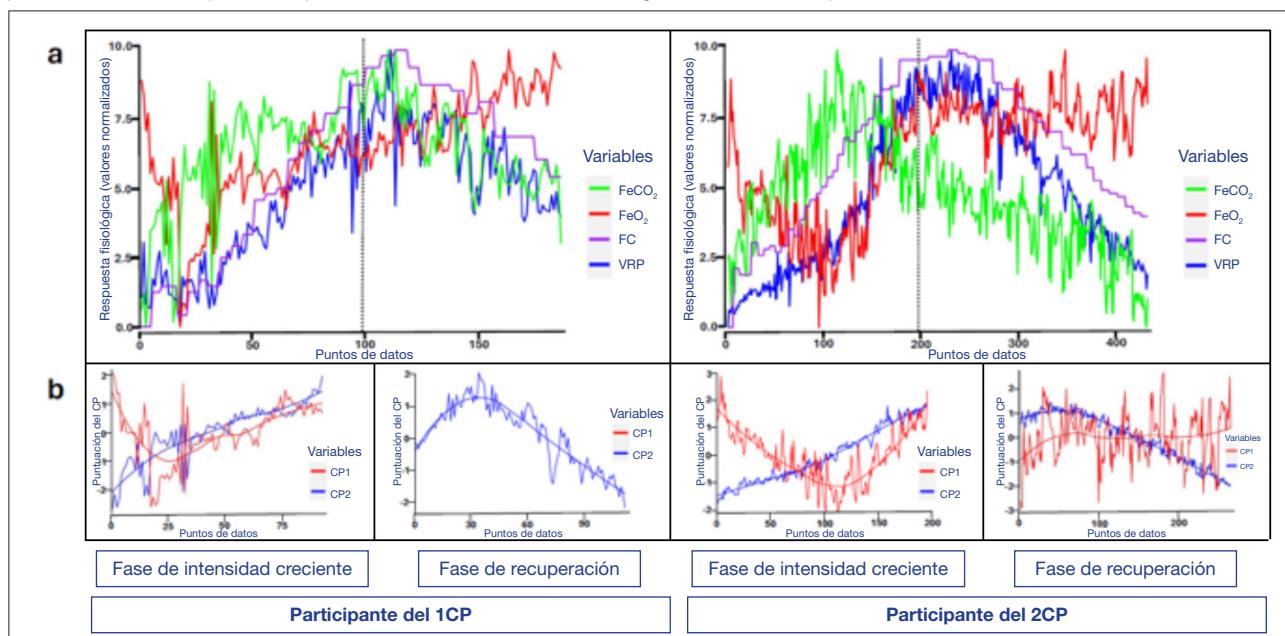
**Tabla 1**Proyecciones ortogonales de las variables sobre  $CP_1$ , para los participantes de ambos grupos durante la fase de recuperación.

ID	Grupo 1PC				Grupo 2CP				
	FeO <sub>2</sub>	FeCO <sub>2</sub>	FC	VRP	ID	FeO <sub>2</sub>	FeCO <sub>2</sub>	FC	VRP
1	-0.80	0.87	0.92	0.88	7	-0.26	-0.21	0.89	-0.21
2	-0.82	0.72	0.77	-0.66	8	-0.84	0.84	0.08	-0.05
3	-0.86	0.89	0.90	0.81	9	-0.35	0.44	0.83	0.87
4	-0.70	0.81	0.94	0.89	10	0.47	0.09	0.95	-0.96
5	-0.71	0.89	0.75	0.76	11	0.14	0.20	0.96	0.96
6	-0.70	0.87	0.92	0.84	12	0.03	0.50	0.96	0.96
					13	-0.06	0.84	0.98	0.98
					14	0.93	-0.94	-0.08	0.11
					15	0.23	0.39	0.96	0.95
Mediana	-0.78*	0.87*	0.91	0.83	Mediana	0.03*	0.39*	0.95	0.87
RIC	0.11	0.06	0.12	0.10	RIC	0.49	0.41	0.13	1.01

Nota: \* $p < .05$ ; FeO<sub>2</sub>: fracción de O<sub>2</sub> espirado; FeCO<sub>2</sub>: fracción de CO<sub>2</sub> espirado; FC: frecuencia cardiaca; VRP: volumen respiratorio por minuto.

**Figura 5**

Ejemplo de la transformación de las variables cardiorrespiratorias en CP en los grupos 1CP y 2CP. (a) Series temporales originales de las cuatro variables cardiorrespiratorias seleccionadas en ambos grupos durante las fases de intensidad creciente y de recuperación. (b) Series temporales de las puntuaciones de CP (valores z estandarizados en el espacio abarcado por los CP) para ambos grupos en ambas fases. Las series de cuatro tiempos se condensaron en una o dos series temporales mediante la reducción de dimensión de los CP. Las líneas azul y roja representan la tendencia media de ambos CP, calculada mediante el método de mínimos cuadrados ponderados. Los puntos de datos del eje x corresponden al número de mediciones registradas durante la prueba.



#### Proyecciones ortogonales del CP<sub>1</sub> durante la fase de recuperación entre los grupos 1CP y 2CP

La Tabla 1 muestra que los participantes del grupo 1CP presentaron respuestas fisiológicas relativamente uniformes durante la fase de recuperación. En concreto, tres variables cardiorrespiratorias (FeCO<sub>2</sub>, FC y VRP) mostraron proyecciones o valores positivos elevados en el CP<sub>1</sub>, mientras que FeO<sub>2</sub> exhibió valores negativos. En concreto, las proyecciones de FeO<sub>2</sub> y FeCO<sub>2</sub> sobre el CP<sub>1</sub> fueron significativamente mayores en el grupo 1CP en comparación con el grupo 2CP (FeO<sub>2</sub>;  $U = 5.00$ ;  $p < .01$ ;  $d = 1.99$ , FeCO<sub>2</sub>;  $d = 1.66$ ). Por el contrario, los

participantes del grupo 2CP no presentaron proyecciones cardiorrespiratorias uniformes en CP<sub>1</sub>.

La Figura 5 ilustra las diferencias entre los resultados de los grupos 1CP y 2CP en la CCR. Durante la fase de intensidad creciente, ambos grupos mostraron resultados similares, y sus variables (FeCO<sub>2</sub>, FC y VRP) registraron un mayor grado de colinealidad con CP<sub>1</sub>, mientras que FeO<sub>2</sub> se alineó mayoritariamente con CP<sub>2</sub>. Sin embargo, en la fase de recuperación, la varianza de las cuatro variables cardiorrespiratorias en el grupo 1CP estaba encapsulada por un CP<sub>1</sub> singular, mientras que el grupo 2CP mostraba tres variables (FeO<sub>2</sub> o FeCO<sub>2</sub>, FC y VRP) con CP<sub>1</sub> y FeCO<sub>2</sub> o FeCO<sub>2</sub> con CP<sub>2</sub>.

**Tabla 2**Comparación de los valores finales de mediana y rango intercuartílico (RIC) de FC, VRP, VO<sub>2</sub> y RPE entre los grupos.

Grupo 1PC				
	FC (b·min <sup>-1</sup> )	VRP (l·min <sup>-1</sup> )	VO <sub>2</sub> (ml·kg <sup>-1</sup> ·min <sup>-1</sup> )	RPE (escala de 6 a 20 de Borg)
Mediana	†107.00**	31.22*	12.15	6.00*
RIC	14.50	9.82	2.17	3.25
Grupo 2CP				
	FC (b·min <sup>-1</sup> )	VRP (l·min <sup>-1</sup> )	VO <sub>2</sub> (ml·kg <sup>-1</sup> ·min <sup>-1</sup> )	RPE (escala de 6 a 20 de Borg)
Mediana	†116.00**	40.72*	12.43	9.50*
RIC	24.00	26.20	3.99	6.13

Nota: † $p < .05$ ;  $d$  = efecto intermedio (\*) y grande (\*\*); FC = frecuencia cardiaca; VRP = volumen respiratorio por minuto; VO<sub>2</sub> = consumo de oxígeno; RPE = percepción subjetiva del esfuerzo.

### Eficacia de la recuperación psicobiológica y rendimiento entre los grupos 1CP y 2CP

La Tabla 2 muestra los valores para ambos grupos de FC, VRP, VO<sub>2</sub> y RPE al final de la fase de recuperación. En comparación con el grupo 2CP, el grupo 1CP presentó valores inferiores en todas las variables estudiadas, con diferencias estadísticamente significativas en la FC ( $U = 7.50$ ;  $p = .03$ ). Los tamaños de los efectos indicaron magnitudes de intermedias a grandes para la FC, la EV y la RPE ( $d = 1.21$ ;  $d = 0.57$ ;  $d = 0.71$ , respectivamente). Además, la duración total de las pruebas realizadas por el grupo 1CP ( $968.17 \pm 179.66$ ), incluidas las fases de intensidad creciente y de recuperación, fue significativamente mayor que la de las realizadas por el grupo 2CP ( $848.22 \pm 234.75$ ) ( $U = 0$ ;  $p < .01$ ;  $d = 0.56$ ).

## Discusión

Las principales conclusiones del presente estudio fueron que: a) la CCR aumentó durante la fase de recuperación de una PECP piramidal; b) los participantes con 1CP en la fase de recuperación mostraron valores propios del CP<sub>1</sub> más altos y una entropía informativa más baja que los que tenían 2CP; y c) los valores de FC, VRP y RPE registrados al final de la PECP fueron más bajos en el grupo 1CP en comparación con el grupo 2CP.

La reducción del número de CP y de la entropía informativa durante la fase de recuperación (de intensidad decreciente), en comparación con la fase de intensidad creciente de la prueba piramidal, sugiere una CCR más eficiente cuando disminuye la carga de trabajo. Aunque esto pueda parecer contradictorio con conclusiones previas, que indicaban un deterioro de la CCR tras un esfuerzo previo (García-Retortillo et al., 2017), los resultados actuales pueden esclarecerse por una mayor implicación del metabolismo anaeróbico durante la fase de intensidad creciente vs. la fase de recuperación. Durante la fase de intensidad creciente, la inercia del metabolismo aeróbico, contrarrestada por la activación de las vías metabólicas lácticas, produjo hiperventilación (Binder et al., 2008; Molkov et al., 2014). Es plausible que esta respuesta, atribuida a la producción de CO<sub>2</sub> no metabólico, causara el aumento del número de CP durante la fase de intensidad creciente, a pesar de que se realizasen las mismas cargas de trabajo en la fase de recuperación.

Montull et al. (2020) también informaron de una falta de simetría en los valores cardiorrespiratorios entre las fases de intensidad creciente y de recuperación de una prueba de ejercicio piramidal, con valores más altos durante la recuperación (fase de intensidad decreciente) para la misma carga de trabajo. Por el contrario, la CCR de este estudio mostró una mayor eficacia durante la recuperación activa. Estas conclusiones confirman el interés de complementar los resultados de las PECP actuales, como la reserva cardiaca y la capacidad cardiorrespiratoria, con parámetros de CCR (es decir, el número de CP y la entropía informativa) (García-Retortillo et al., 2017).

La observación en el grupo 1CP de mayores valores propios del CP<sub>1</sub> y de una menor entropía informativa durante la fase de recuperación, en comparación con el grupo 2CP, significa un mayor nivel de orden, sincronización, eficiencia y adaptabilidad en la respuesta cardiorrespiratoria (Balaguer et al., 2016; García-Retortillo et al., 2017). Esto implica un mayor entrenamiento del aparato cardiorrespiratorio y puede extenderse a otros procesos fisiológicos interrelacionados e integrados; por ejemplo, receptores químicosensibles, sistema límbico-hipotalámico, actividad simpática o parasimpática, o actividad muscular, que operan en diferentes escalas temporales para garantizar la adaptación a la demanda de carga de trabajo (García-Retortillo e Ivanov, 2022; Kairiukstiene et al., 2020; Pocock et al., 2013; Qammar et al., 2022; Velicka et al., 2019).

Durante la fase de recuperación, el grupo 1CP demostró una covariación similar en las cuatro variables cardiorrespiratorias, con valores de FeO<sub>2</sub> elevados que se correlacionaban inversamente con FeCO<sub>2</sub>, FC y VRP. Esta elevación sostenida de FeO<sub>2</sub>, mientras otras variables se recuperaban, sugiere un retraso en la respuesta a la demanda de oxígeno (Bahr y Sejersted, 1991). A pesar de dicho retraso, el grupo 1CP no formó un nuevo CP, probablemente debido a su superior rendimiento, que se tradujo en una menor frecuencia de valores cardiorrespiratorios (es decir, que afectaba a menos puntos de datos) en comparación con el grupo 2CP (Balaguer et al., 2016).

Por el contrario, algunos participantes del grupo 2CP contribuyeron a la formación del CP<sub>2</sub>, principalmente a través de FeO<sub>2</sub>, lo cual se deba probablemente a una mayor hiperventilación al iniciarse la fase de recuperación, lo que indica un intercambio de gases menos eficiente.

Otros participantes del grupo 2CP formaron CP<sub>2</sub> a través de FeCO<sub>2</sub>, lo que sugiere que sobrepasaron su umbral anaeróbico ventilatorio, dando lugar a una hiperventilación sustancial inducida por el exceso de CO<sub>2</sub> no metabólico (Binder et al., 2008; Molkov et al., 2014).

El grupo 1CP mostró valores cuantitativos más bajos de FC, VRP y RPE al final de la fase de recuperación en comparación con el grupo 2CP, a pesar de someterse a una prueba de mayor duración, lo que indica una tolerancia a la carga de trabajo potencialmente mejor. Esto sugiere que los participantes con un rendimiento superior demostraron no solo una mayor eficiencia, sino también una mayor eficacia en la recuperación del aparato cardiorrespiratorio durante las cargas de trabajo piramidales. De hecho, el aumento de la entropía informativa en el grupo 2CP pone de manifiesto posibles disfunciones en los mecanismos de realimentación prospectiva y retrospectiva mediados por los quimiorreceptores para regular la ventilación (Zebrowska et al., 2020). Esta ineficacia puede contribuir a un deterioro más pronunciado del control y la regulación de la función cardiorrespiratoria, lo que en última instancia conduce a un agotamiento más precoz y a valores cuantitativos más elevados de las variables psicobiológicas.

La evaluación de la CCR durante la recuperación tras el ejercicio mediante protocolos piramidales tiene consecuencias clínicas relevantes en las PECP. Este énfasis en la evaluación de la recuperación tras el ejercicio con cambios graduales en las cargas de trabajo conlleva un interesante punto de vista sobre la regulación cardiorrespiratoria posterior al ejercicio, ya que ofrece información sobre el estrés de la carga interna provocado por el ejercicio previo (Bartels et al., 2018; Romero et al., 2017). La aplicación del ACP y la entropía informativa demostró a las claras el potencial para informar sobre la eficiencia y eficacia del aparato cardiorrespiratorio frente al aumento y disminución de la carga de trabajo, lo que refuerza estas medidas como una valiosa evaluación objetiva de la aptitud cardiorrespiratoria de las personas durante el ejercicio (Balagué et al., 2016; Garcia-Retortillo et al., 2017). Este enfoque introduce nuevas posibilidades para el diagnóstico y la predicción de estados de salud y rendimiento en las PECP, incluida la identificación de trastornos fisiológicos o patologías y, lo que es más importante, la prevención de paradas cardíacas (Kairiustiene et al., 2020; Velicka et al., 2019).

Las técnicas de compresión dimensional, como el ACP, reducen la alta dimensionalidad de los datos de series temporales a unos pocos componentes, lo que permite conocer de forma más completa las dinámicas individuales (Denis, 2016). Este enfoque se alinea con la perspectiva de que tales análisis son más integradores y realistas que los indicadores fisiológicos tradicionales que se basan en valores cuantitativos aislados y estáticos (Balagué et al., 2020; Garcia-Retortillo et al., 2017). Además, cabe destacar que los ejercicios piramidales a intensidad submáxima ofrecen una información muy relevante sobre el estado del aparato cardiorrespiratorio y permiten evitar

las pruebas a intensidad máxima, las cuales pueden plantear ciertos riesgos, especialmente para las personas adultas e inactivas.

Este trabajo presentó ciertas limitaciones metodológicas y perspectivas futuras de investigación. Los estrictos criterios de inclusión, que restringían el tamaño de la muestra a personas adultas inactivas y sanas, limitaron la significación estadística de los resultados. Para validar estos resultados preliminares, se justifica la realización de futuros estudios que aumenten el tamaño de la muestra e investiguen diversos grupos de edad y diferentes estados de salud y forma física. En segundo lugar, teniendo en cuenta que este estudio determinó las cargas de trabajo basándose únicamente en el RPE, los futuros estudios deberían añadir otros indicadores objetivos tales como la FC, o bien cargas de trabajo predeterminadas. Por último, los estudios que se lleven a cabo en el futuro deberían considerar la incorporación de la tensión arterial sistólica y diastólica al ACP, junto con otras variables cardiorrespiratorias para integrar más variables relevantes.

Finalmente, aunque el ACP como técnica de dimensión lineal está validado como una herramienta valiosa y sensible para detectar cambios cardiorrespiratorios durante las PECP (Garcia-Retortillo et al., 2017), deben explorarse otras técnicas de análisis de datos para plasmar la dinámica no lineal de la CCR. En este sentido, no solo pueden ser interesantes los métodos de ACP no lineales (Tenenbaum et al., 2000), sino también otros análisis promovidos por la fisiología de redes del ejercicio (Garcia-Retortillo et al., 2020; Garcia-Retortillo e Ivanov, 2022; Garcia-Retortillo et al., 2024; Montull et al., 2023; Vázquez et al., 2016).

## Conclusión

El presente estudio demostró que la coordinación cardiorrespiratoria en personas adultas sanas e inactivas aumentaba durante la recuperación tras el ejercicio. Los participantes con menor número de componentes principales en esta fase mostraron una mayor eficiencia de recuperación y una mayor eficacia del aparato cardiorrespiratorio. Por lo tanto, la coordinación cardiorrespiratoria se refuerza como una variable biológica valiosa para proporcionar información integradora y sensible sobre las pruebas de esfuerzo cardiopulmonar y, en consecuencia, sobre la forma física. Además, el protocolo de ejercicio piramidal a intensidad submáxima parece ser una herramienta adecuada para evaluar a personas adultas e identificar posibles desregulaciones cardiorrespiratorias.

## Agradecimientos

Queremos dar las gracias a los participantes por su disposición a contribuir a este estudio. Asimismo, agradecemos al Departamento de Ciencias Fisiológicas de la Universidad de Barcelona su ayuda en la recogida de datos.

## Referencias

- Bahr, R., & Sejersted, O. M. (1991). Effect of intensity of exercise on excess postexercise O<sub>2</sub> consumption. *Metabolism - Clinical and Experimental*, 40(8), 836–841. [https://doi.org/10.1016/0026-0495\(91\)90012-L](https://doi.org/10.1016/0026-0495(91)90012-L)
- Balady, G. J., Arena, R., Sietsma, K., Myers, J., Coke, L., Fletcher, G. F., Forman, D., Franklin, B., Guazzi, M., Gulati, M., Keteyian, S. J., Lavie, C. J., MacKo, R., Mancini, D., & Milani, R. V. (2010). Clinician's Guide to Cardiopulmonary Exercise Testing in Adults. *Circulation*, 122(2), 191–225. <https://doi.org/10.1161/CIR.0B013E3181E52E69>
- Balagué, N., González, J., Javierre, C., Hristovski, R., Aragón, D., Álamo, J., Niño, O., & Ventura, J. L. (2016). Cardiorespiratory coordination after training and detraining. A principal component analysis approach. *Frontiers in Physiology*, 7(35). <https://doi.org/10.3389/fphys.2016.00035>
- Balagué, N., Hristovski, R., Almarcha, M., García-Retortillo, S., & Ivanov, P. C. (2020). Network Physiology of Exercise: Vision and Perspectives. *Frontiers in Physiology*, 11, 611550. <https://doi.org/10.3389/fphys.2020.611550>
- Bartels, R., Prodell, E., Laterza, M. C., de Lima, J. R. P., & Peçanha, T. (2018). Heart rate recovery fast-to-slow phase transition: Influence of physical fitness and exercise intensity. *Annals of Noninvasive Electrocardiology*, 23(3), 1–7. <https://doi.org/10.1111/anec.12521>
- Binder, R. K., Wonisch, M., Corra, U., Cohen-Solal, A., Vanhees, L., Saner, H., & Schmid, J. P. (2008). Methodological approach to the first and second lactate threshold in incremental cardiopulmonary exercise testing. In *European Journal of Preventive Cardiology* (Vol. 15, Issue 15, pp. 726–734). <https://doi.org/10.1097/HJR.0b013e328304fed4>
- Cohen, J. (1988). Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences (2<sup>nd</sup> ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203771587>
- Denis, D. J. (2016). *Applied Univariate, Bivariate, And Multivariate Statistics*. Wiley.
- Esquius, L., García-Retortillo, S., Balagué, N., Hristovski, R., & Javierre, C. (2022). Physiological-and performance-related effects of acute olive oil supplementation at moderate exercise intensity. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 16(1). <https://doi.org/10.1186/s12970-019-0279-6>
- Faul, F., Erdfelder, E., Lang, A.-G., & Buchner, A. (2007). G\*Power 3: A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behavior Research Methods*, 39(2), 175–191. <https://doi.org/10.3758/bf03193146>
- García-Retortillo, S., Abenza, Ó., Vasileva, F., Balagué, N., Hristovski, R., Wells, A., Fanning, J., Kattula, J., & Ivanov, P. C. (2024). Age-related breakdown in networks of inter-muscular coordination. *GeroScience*, 1–25. <https://doi.org/10.1007/s11357-024-01331-9>
- García-Retortillo, S., Gacto, M., O'Leary, T. J., Noon, M., Hristovski, R., Balagué, N., & Morris, M. G. (2019). Cardiorespiratory coordination reveals training-specific physiological adaptations. *European Journal of Applied Physiology*, 119(8), 1701–1709. <https://doi.org/10.1007/s00421-019-04160-3>
- García-Retortillo, S., & Ivanov, P. C. (2022). Inter-muscular networks of synchronous muscle fiber activation. *Frontiers in Network Physiology*, 2, 1059793. <https://doi.org/10.3389/fnetp.2022.1059793>
- García-Retortillo, S., Javierre, C., Hristovski, R., Ventura, J. L., & Balagué, N. (2017). Cardiorespiratory coordination in repeated maximal exercise. *Frontiers in Physiology*, 8(387). <https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00387>
- García-Retortillo, S., Javierre, C., Hristovski, R., Ventura, J. L., & Balagué, N. (2019). Principal component analysis as a novel approach for cardiorespiratory exercise testing evaluation. *Physiological Measurement*, 40(8), 1–8. <https://doi.org/10.1088/1361-6579/AB2CA0>
- García-Retortillo, S., Rizzo, R., Wang, J. W. J. L., Sitges, C., & Ivanov, P. C. (2020). Universal spectral profile and dynamic evolution of muscle activation: a hallmark of muscle type and physiological state. *Journal of Applied Physiology*, 129(3), 419–441. <https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00385.2020>
- Gunnar Borg. (1998). Borg's perceived exertion and pain scales. Human Kinetics.
- Haken, H. (2000). *Information and Self-Organization. A Macroscopic Approach to Complex Systems*. Springer. <https://doi.org/10.1007/3-540-33023-2>
- Jolliffe, I. (2002). *Principal Component Analysis*. Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/B98835>
- Kairiukstiene, Z., Poderiene, K., Velicka, D., Trinkunas, E., & Poderys, J. (2020). Analysis of ECG parameter dynamics which define fatigue and the functional state of athletes. *Medicina Dello Sport*, 73(1), 32–41. <https://doi.org/10.23736/S0025-7826.20.03515-2>
- Krivoshechov, S. G., Uryumtsev, D. Y., Gulyaeva, V. V., & Zinchenko, M. I. (2021). Cardiorespiratory Coordination in Acute Hypoxia in Runners. *Human Physiology*, 47(4), 80–90. <https://doi.org/10.1134/S0362119721030087>
- Meglen, R. R. (1991). Examining large databases: A chemometric approach using principal component analysis. *Journal of Chemometrics*, 5(3), 163–179. <https://doi.org/10.1002/CEM.1180050305>
- Molkov, Y., Zoccal, D., Baekey, D., Abdala, A., Machado, B., Dick, T., Paton, J., & Rybak, I. (2014). Physiological and pathophysiological interactions between the respiratory central pattern generator and the sympathetic nervous system. *Progress in Brain Research*, 121(1), 1–23. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63488-7.00001-X>
- Montull, L., Abenza, O., Hristovski, R., & Balagué, N. (2023). Hysteresis Area of Psychobiological Variables. A New Non-Invasive Biomarker of Effort Accumulation? *Apunts Educació Física y Deportes*, 152, 55–61. [https://doi.org/10.5672/apunts.2014-0983.es.\(2023/2\).152.06](https://doi.org/10.5672/apunts.2014-0983.es.(2023/2).152.06)
- Montull, L., Vázquez, P., Hristovski, R., & Balagué, N. (2020). Hysteresis behaviour of psychobiological variables during exercise. *Psychology of Sport and Exercise*, 48(August 2019), 101647. <https://doi.org/10.1016/j.psychsport.2020.101647>
- Naudts, J. (2005). Boltzmann entropy and the microcanonical ensemble. *Europhysics Letters*, 69(5), 719–724. <https://doi.org/10.1209/epl/i2004-10413-1>
- Oviedo, G. R., García-Retortillo, S., Carbó-Carreté, M., Guerra-Balic, M., Balagué, N., Javierre, C., & Guàrdia-Olmos, J. (2021). Cardiorespiratory Coordination During Exercise in Adults With Down Syndrome. *Frontiers in Physiology*, 12. <https://doi.org/10.3389/FPHYS.2021.704062>
- Pocock, G., Richards, C. D., & Richards, D. A. (2013). *Human Physiology*. Springer Science & Business Media.
- Qammar, N. W., Orinaité, U., Šiaučiūnaité, V., Vainoras, A., Šakalytė, G., & Ragulskis, M. (2022). The Complexity of the Arterial Blood Pressure Regulation during the Stress Test. *Diagnostics*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/diagnostics12051256>
- Romero, S. A., Minson, C. T., & Halliwill, X. R. (2017). The cardiovascular system after exercise. *Journal of Applied Physiology*, 122(4), 925–932. <https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00802.2016>
- Seely, A. J. E., & Macklem, P. (2012). Fractal variability: An emergent property of complex dissipative systems. *Chaos*, 22(1), 19–22. <https://doi.org/10.1063/1.3675622>
- Tenenbaum, J. B., De Silva, V., & Langford, J. C. (2000). A Global Geometric Framework for Nonlinear Dimensionality Reduction. *Science*, 290(5500), 2319–2323. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.290.5500.2319>
- Vázquez, P., Hristovski, R., & Balagué, N. (2016). The path to exhaustion: Time-variability properties of coordinative variables during continuous exercise. *Frontiers in Physiology*, 7, 37. <https://doi.org/10.3389/fphys.2016.00037>
- Velicka, D., Kairiukstiene, Z., Poderiene, K., Vainoras, A., & Poderys, J. (2019). Interaction between cardiac functional indices during incremental exercise test reveals the peculiarities of adaptation to exercising. *Medicina (Lithuania)*, 55(7), 1–9. <https://doi.org/10.3390/medicina55070314>
- Zebrowska, M., García-Retortillo, S., Sikorski, K., Balagué, N., Hristovski, R., Casimiro, J., & Petelczyc, M. (2020). Decreased coupling among respiratory variables with effort accumulation. *Europhysics Letters*, 132(2), 1–7. <https://doi.org/10.1209/0295-5075/132/28001>

**Conflicto de intereses:** los autores no han informado de ningún conflicto de intereses.

© Copyright Generalitat de Catalunya (INEFC). Este artículo está disponible en la URL <https://www.revista-apunts.com>. Este trabajo tiene licencia de Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International. Las imágenes u otros materiales de terceros de este artículo están incluidos en la licencia Creative Commons del artículo, a menos que se indique lo contrario en la línea de crédito; si el material no está incluido en la licencia Creative Commons, los usuarios deberán obtener el permiso del titular de la licencia para reproducir el material. Para ver una copia de esta licencia, visite <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

