

Evaluación de la carga interna del ejercicio físico mediante la recuperación de la variabilidad de la frecuencia cardíaca en triatletas

Assessment of internal training load using heart rate variability recovery in trained triathletes

*Claudio Nieto-Jiménez, **James D. Cotter, **Tina Van Duijn, **Jake Gawn, ***Oscar F. Araneda, *, ****Marcelo Tuesta
*Universidad Andres Bello (Chile), **University of Otago (New Zealand), ***Universidad de los Andes (Chile), ****Centro Sports Medicina Deportiva (Chile)

Resumen. El objetivo de este estudio fue determinar la carga interna maximal y sub-maximal (umbrales ventilatorios) a través de la recuperación parasimpática posterior a un ejercicio físico de tres modalidades deportivas (natación, ciclismo y carrera) en un grupo de triatletas y su relación con las variables fisiológicas. Para esto, se midió la variabilidad del ritmo cardiaco antes durante y después del ejercicio físico en distintas intensidades. Para conocer la recuperación parasimpática se utilizó la pendiente de la raíz media cuadrática de la suma de las desviaciones estándar de los intervalos RR elevados al cuadrado al finalizar en los primeros 10 minutos de recuperación ($RMSSD_{slope} = RMSSD_{recuperación} - RMSSD_{ejercicio}/t$). En la primera sesión se realizó una prueba de ejercicio maximal para detectar el consumo máximo de oxígeno (VO_{2peak}) para cada modalidad deportiva y la posición de los umbrales ventilatorios (VT_1 y VT_2). En la segunda sesión, cada sujeto realizó una prueba durante 16 minutos a la velocidad del VT_1 . En la tercera sesión, cada sujeto realizó la prueba a la velocidad del VT_2 durante un tiempo que se estableció de tal forma que el producto de intensidad por duración fuera el mismo que en el VT_1 . La carrera presentó el mayor VO_{2peak} (62.0 ± 5.8 mL/min/kg), seguida del ciclismo (58.8 ± 7.9 mL/min/kg) y la natación (48.3 ± 6.2 mL/min/kg), con diferencias significativas entre la carrera y la natación ($p < 0.0001$), y entre el ciclismo y la natación ($p = 0.0002$). La frecuencia cardíaca máxima promedio fue más alta en carrera (191.3 ± 7.4 lpm) y en los umbrales VT_1 y VT_2 respecto a la natación ($p < 0.0001$). La pendiente de recuperación del RMSSD fue mayor en VT_1 y VT_2 para natación respecto al ciclismo (VT_1 y VT_2 : $p < 0.0001$) y la carrera (VT_1 : $p = 0.0007$; VT_2 : $p = 0.0107$). Una correlación negativa moderada pudo ser observada entre la RMSSD y consumo de oxígeno en intensidades submáximas (VT_1 y VT_2) para natación ($r = -0.41$, $p = 0.02$) y ciclismo ($r = -0.37$, $p = 0.039$) y carrera ($r = -0.38$, $p = 0.032$). La $RMSSD_{slope}$ de recuperación es capaz de detectar la carga interna dependiente de la intensidad en pruebas máximas y submáximas de natación, ciclismo y carrera en triatletas.

Palabras clave: Variabilidad de la frecuencia Cardíaca, Carga de entrenamiento, RMSSD.

Abstract. The aim of this study was to determine maximal and sub-maximal internal load (ventilatory thresholds), through parasympathetic recovery after physical exercise, in three sports modalities (swimming, cycling and running) in a group of triathletes. Heart rate variability was measured before and after exercise at different intensities. The slope of the root means square root of the sum of the standard deviations of the squared RR intervals at the end of the first 10 minutes of recovery ($RMSSD_{slope} = RMSSD_{recovery} - RMSS_{Exercise}/time$) was used to observe parasympathetic recovery. In the first session, a maximal oxygen uptake test (VO_{2peak}) was performed for each mode and the position of the ventilatory thresholds (VT_1 and VT_2) was determined. In the second session, each subject performed a test for 16 minutes at VT_1 speed. In the third session, each subject performed the test at VT_2 speed for a time that was set so that the product of intensity and duration was the same as in VT_1 . Running had the highest VO_{2peak} (62.0 ± 5.8 mL/min/kg), followed by cycling (58.8 ± 7.9 mL/min/kg) and swimming (48.3 ± 6.2 mL/min/kg), with significant differences between running and swimming ($p < 0.0001$) and between cycling and swimming ($p = 0.0002$). Maximal heart rate mean was higher in running (191.3 ± 7.4 bpm) and exceeded swimming at VT_1 and VT_2 thresholds ($p < 0.0001$). The slope of RMSSD recovery was greater in VT_1 and VT_2 for swimming in relation to cycling (VT_1 and VT_2 : $p < 0.0001$) and running (VT_1 : $p < 0.0001$; VT_2 : $p < 0.0107$). A moderate negative correlation between RMSSD and the oxygen uptake during submaximal intensities for swimming ($r = -0.41$, $p = 0.02$), cycling ($r = -0.37$, $p = 0.039$) and running ($r = -0.38$, $p = 0.032$). The recovery $RMSSD_{slope}$ can detect the intensity-dependent internal load in maximal and sub-maximal swimming, cycling and running tests in triathletes.

Keywords: Heart Rate Variability, Training load, RMSSD.

Fecha recepción: 25-04-24. Fecha de aceptación: 07-10-24

Marcelo Tuesta

marcelo.tuesta@unab.cl

Introducción

El triatlón es un deporte que combina natación, ciclismo y carrera de manera continua y secuencial, promoviendo una exigencia física única en los deportistas. Lo anterior propone un gran desafío para la periodización de la carga de entrenamiento (CE). De esta forma, resulta fundamental para los entrenadores contar con herramientas precisas para su cuantificación, que a su vez sean capaces de adaptarse a cada modalidad deportiva (Bourdon, P. C., Cardinale, M., Murray, A., Gastin, P., Kellmann, M., Varley, M. C., & Cable, N. T,

2017). Es reconocido que la medición del consumo de oxígeno máximo (VO_{2peak}) y submáximo (en los umbrales metabólicos) es fundamental para la cuantificación de la CE en los deportistas (Millet, G.P., Vleck, V.E. & Bentley, 2009). Estudios previos en triatletas han mostrado diferencias entre los valores de aptitud aeróbica (máximos y sub-máximos) entre las tres disciplinas (Suriano, R., Vercruyssen, F., Bishop, D., & Brisswalter, J, 2007). Así, por ejemplo, Suriano & Bishop (2007) observaron que los valores de VO_{2peak} en pruebas de ciclismo y natación equivalían al $\sim 94-97\%$ y $\sim 74-86\%$ de los obtenidos durante una prueba de carrera, respectivamente.

Esto confirma que la CE es específica para la modalidad deportiva (Suriano & Bishop, 2007). A pesar de que la medición del consumo de oxígeno durante el ejercicio físico es la regla de oro para analizar la CE, su alto costo y dificultad de uso de ciertos ambientes deportivos, tales como en piscina, genera la necesidad de encontrar nuevos métodos que se acomoden mejor a estos ambientes deportivos. El desafío actual es utilizar herramientas que sean precisas, confiables, sencillas (ej. lo puede registrar el propio deportista), de bajo costo y más portables que pueden mejorar la cuantificación diaria en cada sesión de entrenamiento en todos los contextos deportivos. Además, en el triatlón, será relevante que esta herramienta sea capaz de medir de forma precisa en orden secuencial sus disciplinas, es decir, natación, ciclismo y carrera.

Para controlar la CE en un deportista será necesario medir la intensidad y volumen provocado por el ejercicio a través de las cargas mecánicas y temporales exigidas durante el esfuerzo (carga externa, ej. kilogramos totales por semana) y/o la adaptación fisiológica o carga interna (ej. porcentaje de la frecuencia cardíaca máxima) del atleta al esfuerzo realizado (carga externa) (McLaren, S. J., Macpherson, T. W., Coutts, A. J., Hurst, C., Spears, I. R., & Weston, M., 2018; Saboul D, Balducci P, Millet G, Pialoux V, Hautier C. 2016). Una de las herramientas más utilizadas en la actualidad para valorar la carga interna (CI) es el estudio de la variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC), su determinación permite determinar el nivel de modulación simpática y parasimpática del sujeto en respuesta al esfuerzo de forma precisa (Stanley, J., Peake, J. M., & Buchheit, M., 2013; Task Force, 1996). La validez biológica, no-invasividad, bajo costo, y sencillo registro/análisis de datos para su interpretación ha elevado su preferencia para el monitoreo sistemático de la fatiga en un deportista, a diferencia de otros métodos como la medición de biomarcadores sanguíneos (ej. creatina quinasa). Actualmente, los registros de la VFC inmediatamente después del ejercicio han sido objeto de estudio para cuantificar de forma objetiva la CI. En la literatura, existe consenso que la recuperación inmediata de los niveles de actividad parasimpática, medida a través de la raíz cuadrada de la media de las diferencias de la suma de los cuadrados entre intervalos RR adyacentes (RMSSD), depende exclusivamente de la intensidad del ejercicio realizado (Nieto-Jiménez, C., Sánchez, R.; Besomi, M. y Naranjo-Orellana, J, 2023). Esta variable, conocida como una representación temporal de la VFC (Task Force, 1996), es fundamental para entender la respuesta del sistema nervioso autónomo durante la recuperación de un esfuerzo físico. Cabe destacar que las variables del dominio del tiempo, como el RMSSD, presentan menos discrepancias en comparación con las variables del dominio de la frecuencia (Nieto-Jiménez, C, 2023), lo que las convierte en herramientas más consistentes para la evaluación de la recuperación autonómica. Asimismo, explorar diversas intensidades de esfuerzo

físico resulta particularmente útil para comprender la dinámica de la VFC y su relación tanto con el rendimiento como con la recuperación (Kaikkonen, P., Hynynen, E., Mann, T., Rusko, H., & Nummela, A. 2010; Álvarez, J. R., & Nieto, C. 2019; Miranda-Mendoza, J.; Reynoso-Sánchez, L.F.; Hoyos-Flores, J.R.; Quezada-Chacón, J.T.; Naranjo, J.; Rangel-Colmenero, B. y Hernández-Cruz, G. 2020). De esta forma, será necesario considerar la intensidad del ejercicio en la recuperación parasimpática medida por el RMSSD, sobre todo en diferentes modalidades de ejercicio. En este sentido, Naranjo y colaboradores (2019) introdujeron una medida de recuperación parasimpática inmediata llamada $RMSSD_{slope}$ (por su nombre en inglés), la cual se basa en el estudio de la pendiente de la VFC tras el ejercicio (Naranjo Orellana, Nieto-Jiménez, & Ruso-Álvarez, 2019). Este índice permite comparar a sujetos sanos y activos en carreras a diferentes intensidades de esfuerzo físico, determinadas individualmente mediante una prueba de esfuerzo en un tapiz rodante y ajustando las duraciones para mantener una carga de entrenamiento constante. Posteriormente, este indicador fue contrastado en distintas modalidades deportivas (Ruso-Álvarez., Nieto-Jiménez., Muñoz-López and Naranjo, 2019). La $RMSSD_{slope}$ muestra una relación muy estrecha con la intensidad del esfuerzo, observando respuestas fisiológicas individuales específicas ante la misma CE. A pesar de esto, no se puede asumir que estas respuestas sean uniformes para un mismo atleta en diferentes actividades deportivas. Por lo tanto, parece justificable explorar su utilidad práctica como indicador de CI en triatletas entrenados en sus tres disciplinas. Nuestra hipótesis es que, dado que existen diferencias en el VO_{2peak} entre las tres disciplinas para un triatleta, la RMSSD durante la recuperación debería variar según la modalidad deportiva. De esta forma, el objetivo de este estudio es determinar si la carga interna, medida mediante la $RMSSD_{slope}$ de recuperación en los mismos atletas, difiere entre las tres disciplinas y estudiar la relación con los parámetros fisiológicos en cada una de estas modalidades.

Materiales y Métodos

Participantes

En el estudio participaron 17 triatletas (13 hombres, 4 mujeres) entrenados (edad 24.93 ± 7.38 años; peso 71.34 ± 8.07 kg; talla 178.04 ± 5.83 cm). Los criterios de inclusión consideraron a triatletas que realizaban al menos 15 horas de entrenamiento semanal.

Estas características aseguraron que los participantes tuvieran un nivel de acondicionamiento físico adecuado para examinar los parámetros fisiológicos del objetivo del estudio. Se excluyeron aquellos triatletas que tuvieron una lesión que les impidió practicar el deporte durante los 3 meses previos a las mediciones.

Diseño del experimento

Siguiendo las indicaciones generales de la Task Force (1996) se advirtió a todos los sujetos que no tomaran bebidas alcohólicas y/o cafeína 24 horas antes de cada prueba. A cada sujeto se le realizó una anamnesis médica para descartar que estuvieran recibiendo tratamientos o padecieran desórdenes cardiovasculares o de cualquier otro tipo que pudieran incidir o alterar el estado del sistema nervioso autónomo. El estudio se realizó siguiendo la Declaración de Helsinki y fue aprobado por el Comité de Ética Institucional (proyecto N° H21/027). Se informó a los participantes de los posibles riesgos y beneficios de participar en el estudio y firmaron el consentimiento informado antes de iniciar el protocolo.

La duración total del experimento fue de 6 semanas, realizando 9 sesiones en laboratorio, cada sesión separada entre sí por 48-72 horas, y manteniendo condiciones ambientales estables (temperatura y humedad). En la primera sesión, se complementó un cuestionario de antecedentes en cada sujeto y se les midió el peso, talla y realizó una sesión de familiarización para las pruebas de esfuerzo máximas en piscina, cicloergómetro y carrera. El orden de la prueba fue distribuido al azar usando sobres cerrados que eligió el deportista en el momento de la evaluación.

En la primera sesión se realizó una prueba de ejercicio maximal para cada disciplina y se determinó la posición de los umbrales ventilatorios (VT_1 y VT_2) siguiendo la técnica ventilatoria propuesta por Skinner y McLellan (1980), registrándose la velocidad (prueba de natación y carrera) y potencia (prueba de cicloergómetro) correspondiente a cada umbral. Igualmente se determinó la velocidad aeróbica máxima (VAM) o potencia aeróbica máxima (PAM). En la segunda sesión, cada sujeto realizó una prueba de carga constante durante ($\sim 16'$) a la velocidad del VT_1 . En la tercera sesión, cada sujeto realizó cada prueba a la velocidad del VT_2 de forma constante durante un tiempo que se estableció de forma que el producto de la intensidad por duración fuera el mismo que en el VT_1 . Esta prueba estuvo precedida de un calentamiento de 5' al 60% de la VAM o PAM de cada uno de los sujetos.

Para las sesiones de natación y carrera se calculó la CE a partir de la carga externa, esto es el producto de la intensidad (velocidad) por el volumen (tiempo) (Halsón, 2014). Al expresar la velocidad en km/h y el tiempo en horas, la CE queda expresada como la distancia recorrida en km. Para las sesiones de cicloergómetro se calculó la CE como el producto de la intensidad (vatios) por el volumen (tiempo) (Halsón, 2014) Para la carrera se realizó una prueba de esfuerzo maximal en tapiz rodante ErgoRun Medical 8 (Daum Electronic; Fürth, Germany) siguiendo un protocolo escalonado con una carga inicial de 7 km/h, con inclinación de 1%, durante 3 minutos y aumentos de 1 km/h cada minuto. Para el ciclismo se realizó una prueba de esfuerzo maximal en cicloergómetro ErgoRun Medical 8 (Daum Electronic; Fürth,

Germany) siguiendo un protocolo escalonado con una carga inicial de 75 watts cada minuto y aumentos de 30 watts para los hombres y 25 watts para las mujeres. Para la natación se realizó una prueba de esfuerzo maximal con incrementos de 0.05 m/s cada minuto, con una velocidad inicial fijada según el rendimiento del individuo en los 400 m estilo libre (Sousa, A., Vilas-Boas, J. P., Fernández, R. J., & Figueiredo, P., 2017). La velocidad del flujo de agua fue controlada por un operador experimentado del canal. En todas las pruebas se colocó una máscara facial en la cara del participante y se fijó a un esnórquel para medir los gases respiratorios mediante el sistema de análisis de gases ergoespirómetro Breezesuit CPX (Medical Graphics; St. Paul, Minnesota, USA) calibrado antes de cada medición. Los datos de ventilación fueron obtenidos respiración a respiración a partir de un flujómetro de diferencia de presión y las fracciones inspiratoria y espiratoria de O_2 y CO_2 a partir de un analizador de célula galvánica y de infrarrojos respectivamente.

Medidas de la VFC

Se midió la VFC con un pulsómetro V800 Polar sincronizado con una banda torácica H10 HR Sensor (Polar Inc., Kempele, Finland) desde 5 minutos previos a la prueba hasta 10 minutos después de finalizada la misma para realizar las mediciones de VFC. Todas las mediciones pre y post ejercicio se hicieron en posición sentada, en un ambiente tranquilo y silencioso. Las series de tiempo RR se descargaron mediante la aplicación Polar Flow (versión 2.6.2) para ser analizadas con el software Kubios HRV (Versión 2.1, University of Eastern Finland, Kuopio, Finland).

Metodología de medición de la RMSSD_{slope}

La pendiente de la RMSSD (RMSSD_{slope}) fue utilizado como indicador de la actividad parasimpática durante las pruebas con ejercicio físico (Buchheit, M., Papelier, Y., Laursen, P. B., & Ahmaidi, S., 2007; Task-Force, 1996). Para esto, se obtuvieron los registros RR los 5 minutos al final del ejercicio (ejer) y durante los 10 minutos inmediatamente al finalizar el ejercicio (Pos 10min). Previo al análisis, se le aplicó un filtro de umbral muy bajo a cada registro. Ningún registro posterior al filtro superó el 3% de artefactos. Se calculó la pendiente de recuperación de los valores de la RMSSD entre el minuto 5 y el 10 a partir del valor final del ejercicio para cada una de las intensidades realizadas en el experimento (VO_{2peak} , VT_1 y VT_2) por medio de la fórmula $Slope = (RMSSD_{recuperación} - RMSSD_{ejercicio})/t$, donde t es el tiempo transcurrido (Naranjo et al, 2019). Se obtuvo la media y la desviación estándar de todos los valores, para obtener el índice RMSSD_{slope} a los 10 minutos. En cada sesión de ejercicio se registró la percepción subjetiva del esfuerzo mediante la escala de Borg 6-20 (Borg, 1989).

Análisis Estadístico

Todos los datos están presentados como promedio y desviación estándar. Se utilizó la prueba de Shapiro-Wilk para

comprobar la normalidad de las distribuciones. Para contrastar las variables fisiológicas en las tres intensidades (VT_1 , VT_2 y VO_{2peak}) y tipos de ejercicios (natación, ciclismo y carrera) se utilizó la prueba de ANOVA de medidas repetidas (intra-grupo). Un análisis pos-hoc de Bonferroni fue agregado para realizar las comparaciones múltiples. Ahora bien, para contrastar los promedios de la pendiente de la RMSSD de cada intensidad y tipos de ejercicio se utilizó la prueba de Friedman. Una prueba de correlación de Spearman (r) fue llevada a cabo entre las pendientes de la RMSSD y el consumo de oxígeno obtenido en los umbrales ventilatorios. Se utilizó como nivel de significación la probabilidad menor o igual de 0.05. Para el análisis estadístico se utilizó el programa GraphPad Prism, versión 8.4.2. (GraphPad Software, San Diego, CA, USA).

Resultados

La tabla 1 muestra los datos de intensidad de cada modalidad (velocidad y vatios), duración y carga externa, así como los valores de la escala RPE para cada prueba.

Tabla 1.

Promedios y desviaciones estándar de la velocidad, tiempo, potencia y percepción de esfuerzo obtenida de las pruebas de ejercicio maximal en las tres intensidades (VT_1 , VT_2 y VO_{2peak}) para cada disciplina deportiva.

	Natación (m/s)	Ciclismo (Watts)	Carrera (Km/h)	RPE	Tiempo (min)
VO_{2peak}	1.40 ± 0.3	392.9 ± 68.7	19.2 ± 1.8	20.0 ± 0.0	13.8 ± 0.3
VT_1	2.20 ± 0.5	200.0 ± 36.2	11.1 ± 1.3	11.4 ± 1.2	16.0 ± 0.0
VT_2	1.50 ± 0.3	269.8 ± 44.0	14.4 ± 1.6	16.4 ± 1.4	12.3 ± 0.6

VT_1 : primer umbral ventilatorio; VT_2 : segundo umbral ventilatorio; VO_{2peak} : consumo máximo de oxígeno. RPE: índice de esfuerzo percibido.

En la figura 1, los valores alcanzados de VO_{2peak} en natación fueron de 48.3 ± 6.2 mL/min/kg, ciclismo de 58.8 ± 7.9 mL/min/kg y carrera de 62.0 ± 5.8 mL/min/kg. Al comparar entre estos valores se observaron diferencias significativas entre la prueba de carrera vs. natación ($p < 0.0001$); ciclismo vs. natación ($p = 0.0002$) y ciclismo vs. carrera ($p = 0.0263$). La frecuencia cardiaca (FC) máxima alcanzada en la prueba hasta el VO_{2peak} de natación fue de 174.5 ± 4.8 lpm, en ciclismo fue de 186.7 ± 16.6 lpm y corriendo fue de 191.3 ± 7.4 lpm. Aquí se observaron diferencias significativas entre correr versus nadar ($p = 0.0136$) y ciclismo versus nadar ($p < 0.0001$). Sin embargo, no existieron diferencias significativas entre ciclismo y correr ($p = 0.1556$).

En las pruebas constantes a la intensidad VT_1 , los valores de VO_2 alcanzados en la prueba de natación (31.3 ± 4.3 mL/min/kg) correspondió al 65% del VO_{2peak} obtenido en la

prueba máxima en ciclismo (38.9 ± 5.2 mL/min/kg) correspondió al 66% y corriendo (41.4 ± 4.2 mL/min/kg) al 67% del VO_{2peak} . Se observaron diferencias significativas entre la prueba de carrera vs. natación ($p < 0.0001$); ciclismo vs. natación ($p = 0.0001$) y no se observaron diferencias entre la prueba de ciclismo vs. carrera ($p = 0.0793$). La FC alcanzada en la prueba de natación fue de 135.7 ± 10.7 lpm, en ciclismo fue de 142.1 ± 11.1 lpm y corriendo de 149.7 ± 12.4 lpm. Si existieron diferencias significativas entre la prueba corriendo vs. nadando ($p = 0.0011$). No se observaron diferencias entre la prueba de ciclismo vs. nadando ($p = 0.2531$) y ciclismo vs. corriendo ($p = 0.1080$).

En las pruebas constantes a la intensidad VT_2 , los valores alcanzados en la prueba de natación (41.6 ± 5.3 mL/min/kg) correspondió al 86% del VO_{2peak} obtenido en la prueba máxima en ciclismo (50.6 ± 8.3 mL/min/kg) correspondió al 81% y corriendo (53.8 ± 5.4 mL/min/kg) correspondió al 87% del VO_{2peak} obtenido en la prueba máxima. Se observaron diferencias entre la prueba de carrera vs. natación ($p < 0.0001$); ciclismo vs. natación ($p < 0.0001$) y ciclismo vs. carrera ($p = 0.0264$). La FC alcanzada en la prueba de natación fue de 165.5 ± 8.2 lpm, en ciclismo fue de 168.1 ± 9.6 lpm y corriendo de 174.3 ± 11.4 lpm. Si existieron diferencias entre la prueba corriendo vs. nadando ($p = 0.0047$). No se observaron diferencias entre la prueba de ciclismo vs. nadando ($p = 0.9171$) y ciclismo vs. corriendo ($p = 0.0644$).

En la figura 2, en la prueba de VO_{2peak} , la pendiente de recuperación de la RMSSD ($RMSSD_{slope}$) fue significativamente mayor ($p < 0.0001$) en natación ($slope = 0.99 \pm 0.6$) en comparación con ciclismo ($slope = 0.49 \pm 0.6$) y carrera ($p < 0.0107$; $slope = 0.51 \pm 0.6$). En cuanto a la prueba del primer umbral ventilatorio (VT_1), no se observaron diferencias significativas en la $RMSSD_{slope}$ entre las modalidades de ciclismo ($slope = 2.02 \pm 1.2$) y carrera ($slope = 2.02 \pm 1.2$). Se observaron diferencias significativas en las modalidades de natación ($slope = 1.99 \pm 1.2$) con el ciclismo ($p < 0.0001$) y carrera ($p < 0.0007$). Finalmente, en la prueba del segundo umbral ventilatorio (VT_2), la $RMSSD_{slope}$ fue mayor en natación ($slope = 0.93 \pm 0.6$) en comparación con ciclismo ($slope = 0.83 \pm 0.6$) y carrera ($slope = 0.71 \pm 0.6$). Existieron diferencias significativas entre las pruebas de natación vs. ciclismo ($p > 0.0107$), natación vs. carrera ($p > 0.0001$) y ciclismo vs. carrera ($p > 0.0107$).

En la figura 3, se encontró una correlación negativa entre $RMSSD_{slope}$ y el VO_2 luego del ejercicio en las intensidades submáximas (VT_1 y VT_2) en las tres disciplinas deportivas (natación, carrera y ciclismo).

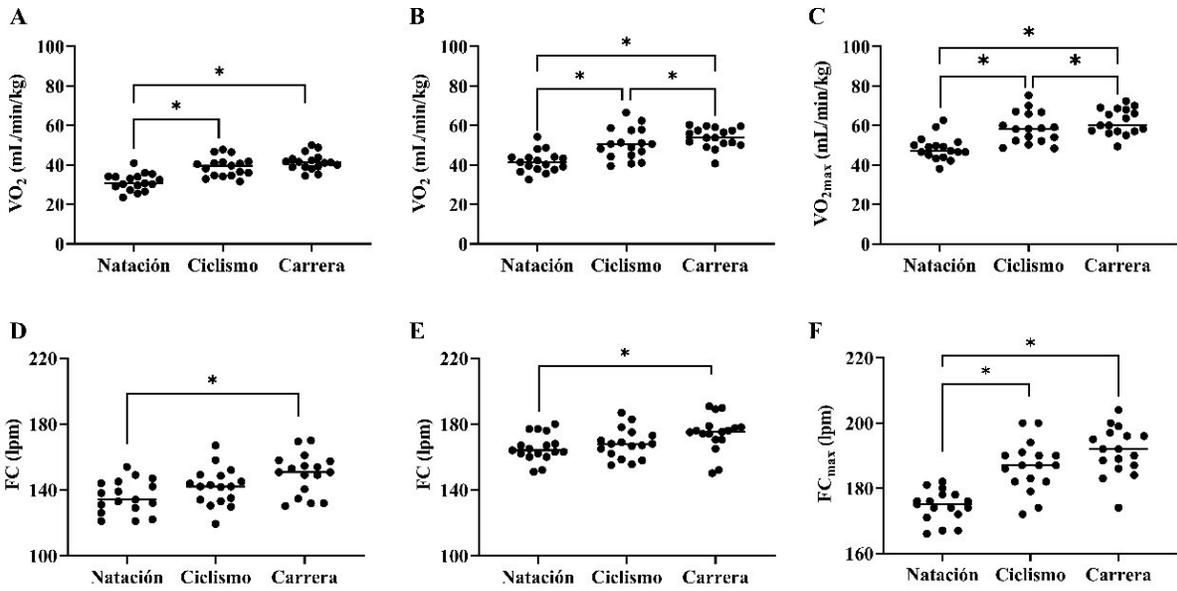


Figura 1. Consumo de oxígeno y frecuencia cardiaca promedios para la natación, ciclismo y carrera en las tres intensidades de esfuerzo (VT₁ [A y D], VT₂ [B y E] y VO_{2peak} [C y F]). FC_{max}: Frecuencia cardiaca máxima, VT₁: umbral ventilatorio 1, VT₂: umbral ventilatorio 2, VO_{2peak}: consumo máximo de oxígeno, *p<0.05.

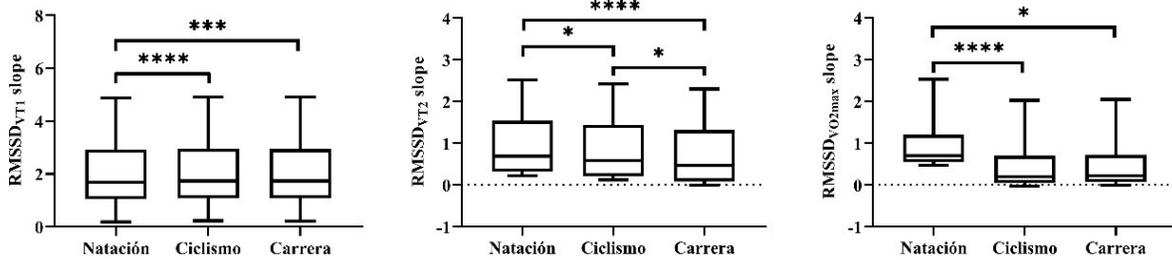


Figura 2. Valores de RMSSD_{slope} promedios y desviación estándar para las tres intensidades el VT₁ (A) y VT₂ (B) y VO_{2peak} (C) durante las tres etapas del ejercicio (Previo al ejercicio, al final del ejercicio y durante la recuperación) en las tres modalidades deportivas. *p<0.05, ***p<0.001, ****p<0.0001.

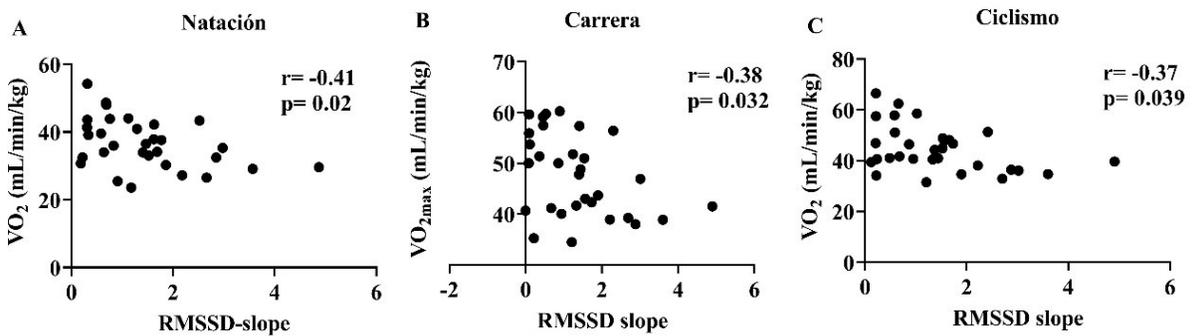


Figura 3. Asociaciones entre el VO₂ (VT₁ y VT₂) y la RMSSD_{slope} para las tres disciplinas deportivas.

Discusión

Los principales hallazgos de nuestro estudio mostraron que la $RMSSD_{slope}$ fue distinta entre natación con ciclismo y carrera para las tres intensidades de esfuerzo (VT_1 , VT_2 y VO_{2max}), sin embargo, entre carrera y ciclismo sólo fue en VT_2 . Además, una mayor pendiente en la $RMSSD_{slope}$ se relacionó con una menor carga interna (VO_2) en las intensidades submáximas (VT_1 y VT_2) en todas las disciplinas.

En la literatura científica se ha demostrado que la disminución del estímulo parasimpático durante el esfuerzo físico es total, independiente de la carga o modalidad deportiva realizada (Ruso-Álvarez et al, 2019; Naranjo et al, 2019). Este hallazgo coincide con nuestros resultados, en los que se observa una caída de la actividad vagal a un valor medio de 4.2 ms ($RMSSD$) durante el ejercicio, sin importar la intensidad y ni la modalidad de éste. Además, de acuerdo con estudios anteriores (Nieto et al; 2020), una vez comenzada la recuperación se observa un aumento progresivo de sus valores a intensidades sobre VT_1 a diferencia de las otras intensidades (VO_{2peak} y VT_2). En nuestros resultados los valores fueron significativamente mayores en la prueba de natación que en ciclismo y carrera. Estas diferencias en la recuperación de la $RMSSD_{slope}$ podrían explicarse por un menor gasto metabólico en el VT_1 de la natación (31.3 mL/min/kg; FC=135 lpm) respecto a ciclismo (38.3 mL/min/kg; FC=142 lpm) y carrera (41.4 mL/min/kg; FC=149 lpm). La mejora de la $RMSSD_{slope}$ en natación puede estar relacionada a varios factores. En primer lugar, la posición horizontal en el agua facilita el retorno venoso desde las extremidades, lo cual podría reducir la demanda cardiovascular. Además, el efecto antigravitatorio del agua provocará un menor impacto sobre el sistema osteo-muscular, disminuyendo la activación de aferentes mecánicos relacionados con el aumento del *drive* ventilatorio y gasto cardiaco (Enoka, Duchateau, 2008). Por último, se ha demostrado que la presión hidrostática genera una menor CI en comparación con otras disciplinas debido a una mayor modulación barorrefleja (aumento del parasimpático y disminución del simpático) en el entorno acuático (Stanley, Peake, & Buchheit, 2013). Por lo tanto, estos factores contribuirán a una CI más baja, y, consecuentemente, a una respuesta predominantemente parasimpática del sistema autonómico. Según nuestro conocimiento, este es el primer estudio que ha analizado valores de $RMSSD_{slope}$ post esfuerzo en nadadores.

En nuestro estudio, la recuperación de la $RMSSD_{slope}$ es progresiva y diferente según la intensidad en sujetos entrenados en la disciplina de triatlón, situación que ha sido comunicada por otros autores para sujetos sanos (Ruso et al, 2019) y mujeres sedentarias (Nieto et al, 2020). Asimismo, a intensidades más bajas ha sido reportado que la recuperación vagal es más rápida que en altas intensidades en sujetos sedentarios en cicloergómetro (Kaikkonen et al., 2007) y sujetos activos en tapiz rodante (Casonatto et al., 2011). Nuestros resultados

muestran que los promedios de la $RMSSD_{slope}$ son más bajos en todas las disciplinas a medida que la intensidad de la prueba fue mayor (Figura 2). Asimismo, es importante destacar que, para todas las disciplinas, las diferencias observadas entre los consumos de oxígenos en las tres intensidades coincidieron con las diferencias observadas entre las pendientes de la $RMSSD$ (figura 1 y 2). Las diferencias entre las cargas internas entre para todas las intensidades, excepto en el VT_2 para carrera y ciclismo, lo que a nuestro parecer demuestra la importancia de controlar la CI de cada disciplina por separado (sobre todo en natación). Junto con esto, La natación presentó mayor pendiente de la $RMSSD$ y menor VO_2 en todas las pruebas, lo cual corrobora la importancia de tener una herramienta como la $RMSSD$ en esta disciplina. Ahora bien, no sólo las complicaciones del terreno son las complejas para estas disciplinas, sobre todo el agua, sino que también el costo elevado de los equipos de VO_2 , la incomodidad de su uso y captura de datos.

Estudios previos en sujetos sanos mostraron que cuando la intensidad del ejercicio fue menor, y por lo tanto la CI (frecuencia cardiaca y VO_2), mayor era el valor de la pendiente (Naranjo et al 2019, Nieto et al 2020). En el actual trabajo, utilizando un análisis de asociaciones demostramos que una mayor pendiente en la $RMSSD_{slope}$ se relacionó con un menor VO_2 en intensidades submáximas en natación, ciclismo y carrera (figura 3). La relevancia práctica de estos resultados radica en que la variable $RMSSD$ sería capaz de detectar los cambios asociados a la CI medida con consumo de oxígeno en triatletas, pudiendo ser considerada una determinación de ésta en diversos ambientes deportivos, sobre todo en terrenos complejos como el agua. Asimismo, medir este parámetro durante la recuperación permitirá disminuir los artefactos propios creados por el movimiento en los distintos dispositivos de medición tal como medidores de consumo de oxígeno portátil (viento en contra sobre la turbina), monitores cardiacos, acelerómetros, o incluso, la dificultad de controlar la percepción de esfuerzo en tiempo real por los entrenadores.

La principal limitación de este estudio fue la interrupción en 4 semanas debido a la situación sanitaria del COVID-19 extendiendo el tiempo de diseño inicial para 4 de los 17 participantes. Por otra parte, una proyección interesante sería repetir el experimento comparando las recuperaciones con y sin vuelta a la calma.

Conclusión

La recuperación de la actividad parasimpática del sistema nervioso autónomo a través del estudio de la $RMSSD_{slope}$ es capaz de detectar la carga interna independiente de la intensidad en triatletas durante pruebas máximas y submáximas de natación, carrera y ciclismo. El uso de la $RMSSD_{slope}$ es una herramienta sencilla y útil que permite valorar la carga interna.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a los participantes que han facilitado su disponibilidad de datos para realizar este trabajo en las 10 sesiones de evaluaciones y a la Escuela de Educación física de la Universidad de Otago.

Referencias

- Bourdon, P. C., Cardinale, M., Murray, A., Gastin, P., Kellmann, M., Varley, M. C., & Cable, N. T. (2017). Monitoring athlete training loads: Consensus statement. *International Journal of Physiology and Performance*, 12(S2), 161–170. <https://doi.org/10.1123/IJSP.2017-0208>
- Buchheit, M., Papelier, Y., Laursen, P. B., & Ahmaidi, S. (2007). Noninvasive assessment of cardiac parasympathetic function: Postexercise heart rate recovery or heart rate variability? *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, 293(1), H8–H10. <https://doi.org/10.1152/ajpheart.00062.2007>
- Casonatto, J., Tinucci, T., Dourado, A. C., & Polito, M. (2011). Cardiovascular and autonomic responses after exercise sessions with different intensities and durations. *Clinics*, 66(3), 453–458. <https://doi.org/10.1590/S1807-59322011000300016>
- Enoka, R. M., & Duchateau, J. (2008). Muscle fatigue: what, why and how it influences muscle function. *The Journal of physiology*, 586(1), 11–23.
- Goldberger, J. J., Le, F. K., Lahiri, M., Kannankeril, P. J., Ng, J., & Kadish, A. H. (2006). Assessment of parasympathetic reactivation after exercise. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, 290(6), H2446–H2452. <https://doi.org/10.1152/ajpheart.01118.2005>
- Halson, S. L. (2014). Monitoring training load to understand fatigue in athletes. *Sports Medicine*, 44, 139–147. <https://doi.org/10.1007/s40279-014-0253-z>
- Kaikkonen, P., Hynynen, E., Mann, T., Rusko, H., & Nummela, A. (2010). Can HRV be used to evaluate training load in constant load exercises? *European Journal of Applied Physiology*, 108, 435–442. <https://doi.org/10.1007/s00421-009-1240-1>
- McLaren, S. J., Macpherson, T. W., Coutts, A. J., Hurst, C., Spears, I. R., & Weston, M. (2018). The relationships between internal and external measures of training load and intensity in team sports: A meta-analysis. *Sports Medicine*, 48, 641–658. <http://orcid.org/0000-0002-6943-7302>
- Millet, G.P., Vleck, V.E. & Bentley, D.J. Physiological Differences Between Cycling and Running. *Sports Med* 39, 179–206 (2009). <https://doi.org/10.2165/00007256-200939030-00002>
- Miranda-Mendoza, J., Reynoso-Sánchez, L. F., Hoyos-Flores, J. R., Quezada-Chacón, J. T., Naranjo, J., Rangel-Colmenero, B., & Hernández-Cruz, G. (2020). Stress score and lnRMSSD as internal load parameters during competition. *Revista Internacional de Medicina y Ciencias de la Actividad Física y el Deporte*, 20(77), 21–35. <https://doi.org/10.15366/rimcafd2020.77.00>
- Naranjo Orellana, J., Nieto-Jiménez, C., & Ruso-Álvarez, J. F. (2019). Recovery slope of heart rate variability as an indicator of internal training load. *Health*, 11, 211–221. <https://doi.org/10.4236/health.2019.112019>
- Nieto-Jiménez, C., Bertoglia-Ghiglino, C., Soto-Voisier, E., Morales-Rodríguez, I., Sepúlveda-Catalán, F., Quintiliano-Scarpell, D., & Ruso-Álvarez, J. F. (2020). Variabilidad de la frecuencia cardíaca como indicador de carga interna en mujeres no deportistas: Estudio piloto. *Archivos de Medicina del Deporte*, 234–238.
- Nieto-Jiménez, C., Sánchez, R., Besomi, M., & Naranjo-Orellana, J. (2023). One year follow-up with heart rate variability in trail runners. *Revista Internacional de Medicina y Ciencias de la Actividad Física y el Deporte*, 23(89), 446–457. <https://doi.org/10.15366/rimcafd2023.89.031>
- Ruso-Álvarez, J. F. R., & Nieto, C. (2019). La recuperación parasimpática tras el esfuerzo como medida de carga de trabajo. *Archivos de Medicina del Deporte: Revista de la Federación Española de Medicina del Deporte y de la Confederación Iberoamericana de Medicina del Deporte*, 36(194), 356–359.
- Ruso-Álvarez, J. F., Nieto-Jiménez, C., Muñoz-López, A., & Naranjo Orellana, J. (2019). Utility of the "RMSSD-Slope" to assess the internal load in different sports situations. *Health*, 11, 683–691. <https://doi.org/10.4236/health.2019.116057>
- Saboul D, Balducci P, Millet G, Pialoux V, Hautier C. A pilot study on quantification of training load: The use of HRV in training practice. *Eur J Sport Sci*. 2016;16(2):172-81. doi: 10.1080/17461391.2015.1004373. Epub 2015 Feb 6. PMID: 25657120.
- Sandercock, G. R., Bromley, P. D., & Brodie, D. A. (2005). Effects of exercise on heart rate variability: Inferences from meta-analysis. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 37(3), 433–439. <https://doi.org/10.1249/01.mss.0000155388.39002.9d>
- Skinner, J. S., & McLellan, T. H. (1980). The transition from aerobic to anaerobic metabolism. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 51(1), 234–248. <https://doi.org/10.1080/02701367.1980.10609285>

- Sousa, A., Vilas-Boas, J. P., Fernandes, R. J., & Figueiredo, P. (2017). VO₂ at maximal and supramaximal intensities: Lessons to high-intensity interval training in swimming. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 12(7), 872–877. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2016-0475>
- Stanley, J., Peake, J. M., & Buchheit, M. (2013). Cardiac parasympathetic reactivation following exercise: Implications for training prescription. *Sports Medicine*, 43(12), 1259–1277. <https://doi.org/10.1007/s40279-013-0083-4>
- Stanley, J., Peake, J. M., & Buchheit, M. (2013). Consecutive days of cold water immersion: effects on cycling performance and heart rate variability. *European journal of applied physiology*, 113, 371–384.
- Suriano, R., Vercruyssen, F., Bishop, D., & Brisswalter, J. (2007). Variable power output during cycling improves subsequent treadmill run time to exhaustion. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 10(4), 244–251. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2006.06.019>
- Task Force of The European Society of Cardiology and The North American Society of Pacing and Electrophysiology. (1996). Heart rate variability: Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. *European Heart Journal*, 17, 354–381. <https://doi.org/10.1161/01.CIR.93.5.1043>

Datos de los/as autores/as:

Claudio Nieto-Jimenez	claudionietojimenez@gmail.com	Autor/a
Tina Van Duijn	tinavanduijn@gmail.com	Autor/a
Jake Gawn	jmg_nz98@hotmail.com	Autor/a
James D. Cotter	jim.cotter@otago.ac.nz	Autor/a
Oscar F. Araneda	ofaraneda@miuandes.cl	Autor/a
Marcelo Tuesta	marcelo.tuesta@unab.cl	Autor/a