



UNIVERSITAS
Miguel Hernández

Uso de la variabilidad de la
frecuencia cardíaca para detectar
umbrales en cualquier población:
Revisión sistemática.

Alumno: Juan Miguel Navarro González

Tutor/a Académico: Alejandro Javaloyes Torres.

Grado en Ciencias de la Actividad Física y el Deporte

Curso académico: 2024-2025.

Índice

| | |
|--|----|
| Contextualización | 1 |
| Procedimiento de revisión (metodología)..... | 2 |
| Resultados..... | 3 |
| Discusión..... | 13 |
| Conclusiones..... | 13 |
| Propuesta de intervención | 14 |
| Bibliografía | 15 |



Contextualización

Los deportes de resistencia, como el ciclismo, el atletismo y el triatlón requieren de una evaluación precisa en el rendimiento y en la capacidad cardiorrespiratoria de los deportistas. La evaluación del estado de forma, la fatiga y la recuperación es importante para poder optimizar el entrenamiento y prevenir el sobreentrenamiento (Halson, 2014). Tradicionalmente, estas evaluaciones se han caracterizado por pruebas que se realizan tanto en laboratorio como en campo. Aunque estas evaluaciones pueden llegar a ser muy efectivas, no dejan de ser invasivas y costosas. Es por ello y en este contexto, que la variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC) ha demostrado ser una herramienta no invasiva para evaluar la regulación autónoma cardíaca proporcionando así información muy relevante sobre la capacidad de recuperación, la fatiga acumulada y las adaptaciones fisiológicas al entrenamiento. (European heart journal et al., 1996; Vesterinen et al., 2013). Su análisis permite a los entrenadores y deportistas ajustar las cargas de trabajo y así optimizar el rendimiento.

La VFC se define como la variación que existe entre los intervalos R-R registrados que se mide en milisegundos en un electrocardiograma, lo que evidencia la interacción entre el SNA y la frecuencia cardíaca (Díaz et al., 2014; Lakusic et al., 2015). La VFC se emplea como un parámetro que nos indica como es nuestra salud cardiovascular, permitiendo así de manera no invasiva evaluar la actividad del sistema nervioso autónomo (SNA). Respecto a la relación que hay entre la VFC y el SNA conocemos que cuando existe un predominio de la actividad parasimpática existe un incremento en los valores de la VFC. (Pumprla et al., 2002). Las fluctuaciones observadas en la VFC reflejan una respuesta del equilibrio entre el sistema simpático y parasimpático del SNA, lo que lo convierte en un indicador clave para conocer el estado fisiológico de los deportistas (Ford et al., 2013; Lakusic et al., 2015)

En el ámbito del ciclismo, diversos estudios han demostrado que acumular esfuerzo físico y la intensidad a la que se trabaja en los entrenamientos tiene como respuesta cambios significativos en la VFC, tanto durante el ejercicio físico como en la regulación del tono vagal durante el reposo (Rosales et al., 2016). También se ha podido observar que entrenamientos de alta intensidad reducen la actividad parasimpática y aumentan la actividad simpática, lo que disminuye la VFC y puede indicar fatiga acumulada (Buchheit & Gindre, 2006). Por otro lado, la recuperación de la VFC tras el ejercicio se relaciona con una mejora en la capacidad de adaptación que tiene el organismo y como resultado que exista un mayor rendimiento a largo plazo (Plews et al., 2013).

Además, los programas de entrenamiento basados en la monitorización de la VFC han mostrado mayores incrementos de rendimiento en ciclistas entrenados en comparación con entrenamientos estándares y sin ningún control de la VFC (Javaloyes et al., 2021). Sin embargo, otros estudios han considerado que la relación que hay entre la VFC y el rendimiento de los deportistas no es lineal, ya que puede estar influenciada por factores externos e incluso algunos son difíciles de controlar en un contexto ecológico, como la calidad de sueño, el estado de hidratación y el estrés mental, lo que hace que debamos tener en cuenta y realizar un enfoque individualizado para su aplicación. (Stanley et al., 2013)

Puesto que la optimización del entrenamiento es uno de los factores clave para conseguir un buen rendimiento deportivo, la búsqueda de herramientas no invasivas y accesibles para evaluar la carga de entrenamiento y la fatiga se hace imprescindible. La VFC podría considerarse como una alternativa eficiente y segura para guiar programas de entrenamientos individualizados, minimizando así el riesgo de sobreentrenamiento no funcional y favorecer la obtención de adaptaciones fisiológicas. Sin embargo, aún es necesario establecer un protocolo más estricto a la hora de utilizar la VFC comparándolo con métodos más tradicionales para determinar su utilidad en deportes de carácter cíclico de alto rendimiento.

En los últimos años, los avances tecnológicos y en los protocolos de medición nos han proporcionado facilidad a la hora utilizar la VFC como un instrumento de registro diario, esto se debe a que existen dispositivos portátiles como pulsómetros y aplicaciones móviles que facilitan la medición de la VFC. Por tanto, su implementación en el entrenamiento deportivo sea rápida y fácil (Plews et al., 2017). Estudios recientes han demostrado que existe validez y fiabilidad en aplicaciones para smartphones para la medición de la VFC en mediciones cortas y ultracortas en deportistas de resistencia (Moya-Ramon et al., 2022). Por otro lado, su aplicación ha optimizado el rendimiento, ya que la VFC ha sido utilizada como un biomarcador para detectar signos de fatiga, mal adaptación al entrenamiento e incluso anomalías cardíacas en deportistas (Schmitt et al., 2015). Esto nos hace reflexionar de la importancia que tiene continuar investigando sobre su utilidad como herramienta de monitorización de la respuesta al entrenamiento en los deportes de resistencia, como el ciclismo, el atletismo y el triatlón.

La evaluación fisiológica es muy importante en los deportes de resistencia, ya que nos permite medir de forma objetiva el rendimiento, la fatiga y adaptaciones al entrenamiento. Estas evaluaciones nos van a permitir comprender mejor las relaciones dosis-respuesta de los atletas al entrenamiento algo crucial si queremos ajustar las cargas de trabajo y optimizar el rendimiento de los deportistas (Lacome et al., 2018)

El Gold standard para determinar los umbrales fisiológicos es una prueba de esfuerzo incremental con análisis de gases respiratorios (espirometría), ya que permite de forma directa conocer el consumo máximo de oxígeno (V_{O2max}) y los umbrales ventilatorios (VT1 Y VT2), indicadores claves para optimizar el rendimiento cardiorrespiratorio y el metabolismo energético durante el ejercicio (Jamnick et al., 2020).

Sin embargo, las anteriores pruebas que se han mencionado anteriormente presentan dificultades para realizarse, ya que suelen ser invasivas, costosas y requieren de un equipamiento especializado. Por lo tanto, la VFC ha ganado mucha importancia como herramienta no invasiva para detectar umbrales fisiológicos, además de evaluar el estado de fatiga y analizar las adaptaciones fisiológicas del entrenamiento (Plews et al., 2017).

Por ello, este trabajo tiene como objetivo analizar la VFC como una herramienta para detectar y determinar umbrales fisiológicos en deportistas de resistencia, evaluando así su precisión y comparándolas con los Gold estándar. En este sentido surge la siguiente pregunta de investigación:

¿Es la VFC una herramienta efectiva para detectar y determinar los umbrales fisiológicos en comparación con los métodos tradicionales en cualquier población?

Procedimiento de revisión (metodología)

Este trabajo se ha diseñado como una revisión sistemática siguiendo el protocolo establecido por la guía PRISMA 2020 (Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses). El objetivo principal es revisar lo que la literatura científica nos ofrece sobre el uso de la variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC) para la detección de umbrales fisiológicos en ciclismo y su comparabilidad con los métodos tradicionales.

Para seleccionar los estudios incluidos en la revisión, se aplicaron los siguientes criterios definidos en el esquema PICO (Participantes, intervención, comparación y resultados):

Participantes: Cualquier población.

Intervención: Uso de la VFC para detectar umbrales.

Comparación: Grupo control que, si mide los umbrales y grupo que determina los umbrales en base a la VFC.

Resultados: Detectar y determinar umbrales a través de la VFC.

Los artículos que fueron desechados fueron porque no cumplían con los siguientes criterios:

a) estudios que no evalúen la VFC como una herramienta de detección de umbrales; b) estudios que no estén comprendidos entre 2020-2025; c) estudios que no comparen con la VFC con los umbrales fisiológicos; d) artículos que no estén redactados en inglés o español; e) artículos que se centren en otros usos de la VFC como puede ser: la recuperación, el sueño y el estrés.

Se realizó una búsqueda bibliográfica en tres bases de datos diferentes: Pubmed, Scopus y Sportdiscud desde enero de 2025 hasta marzo de 2025 para poder detectar publicaciones más recientes.

La estrategia de búsqueda empleada fue con los siguientes términos, los siguientes operadores booleanos y con ello se construyó la siguiente frase:

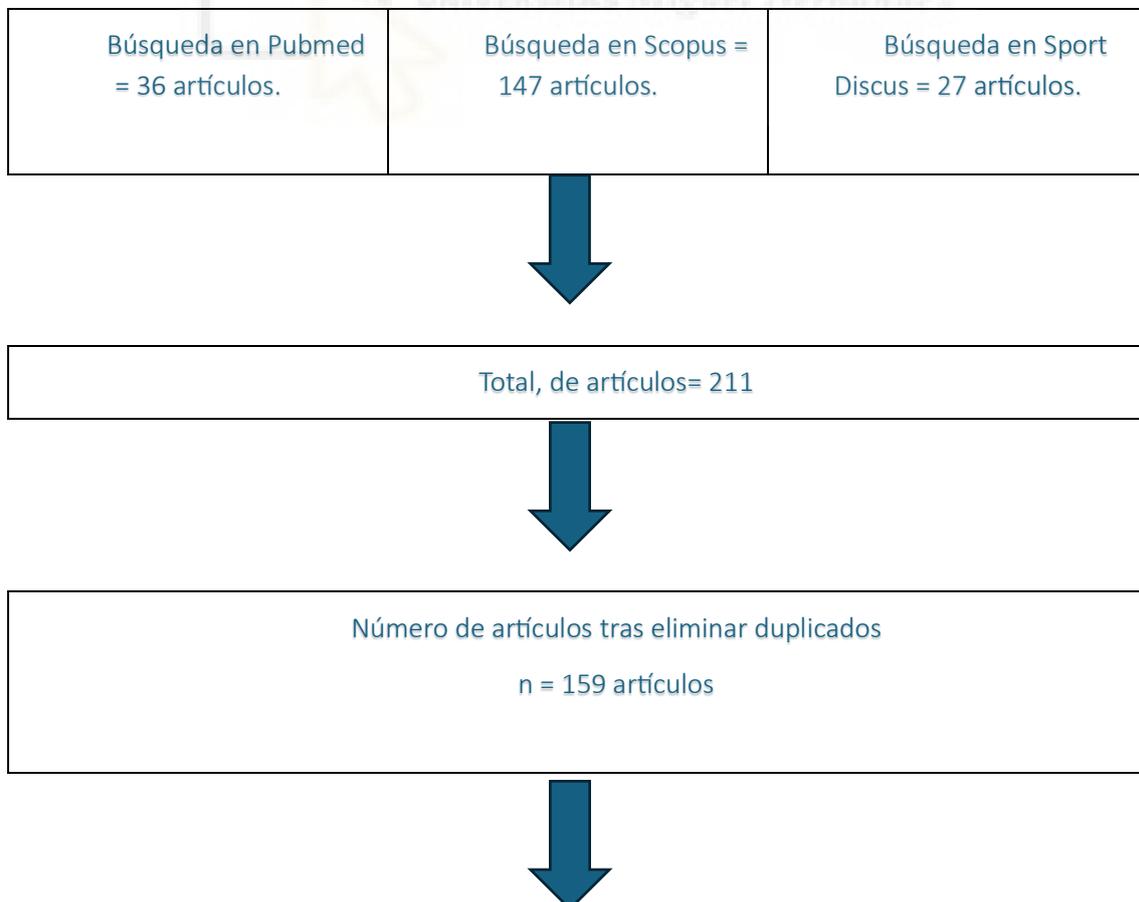
("Heart Rate Variability" OR HRV) AND ("thresholds") AND ("exercise" OR "athletes").

Para el proceso de filtración los estudios obtenidos fueron gestionados por el software Mendeley, para eliminar los artículos duplicados de forma automática y de forma manual los que seguían apareciendo en la plataforma. Además, aplicaremos la Escala Pedro para evaluar la rigurosidad de los estudios elegidos. La evaluación de elegibilidad se realizó siguiendo los criterios ya descritos anteriormente, leyendo títulos y resumen.

Tras la búsqueda inicial se obtuvieron 211 artículos, que tras eliminar los duplicados con el software Mendeley se quedaron en 159 artículos. Una vez aplicado el criterio de inclusión/exclusión nos quedamos con 53 artículos los cuales procedemos a leer título y abstract.

Tras leer título y abstract nos quedamos con 34 artículos que tendremos que leer el texto completo.

Resultados



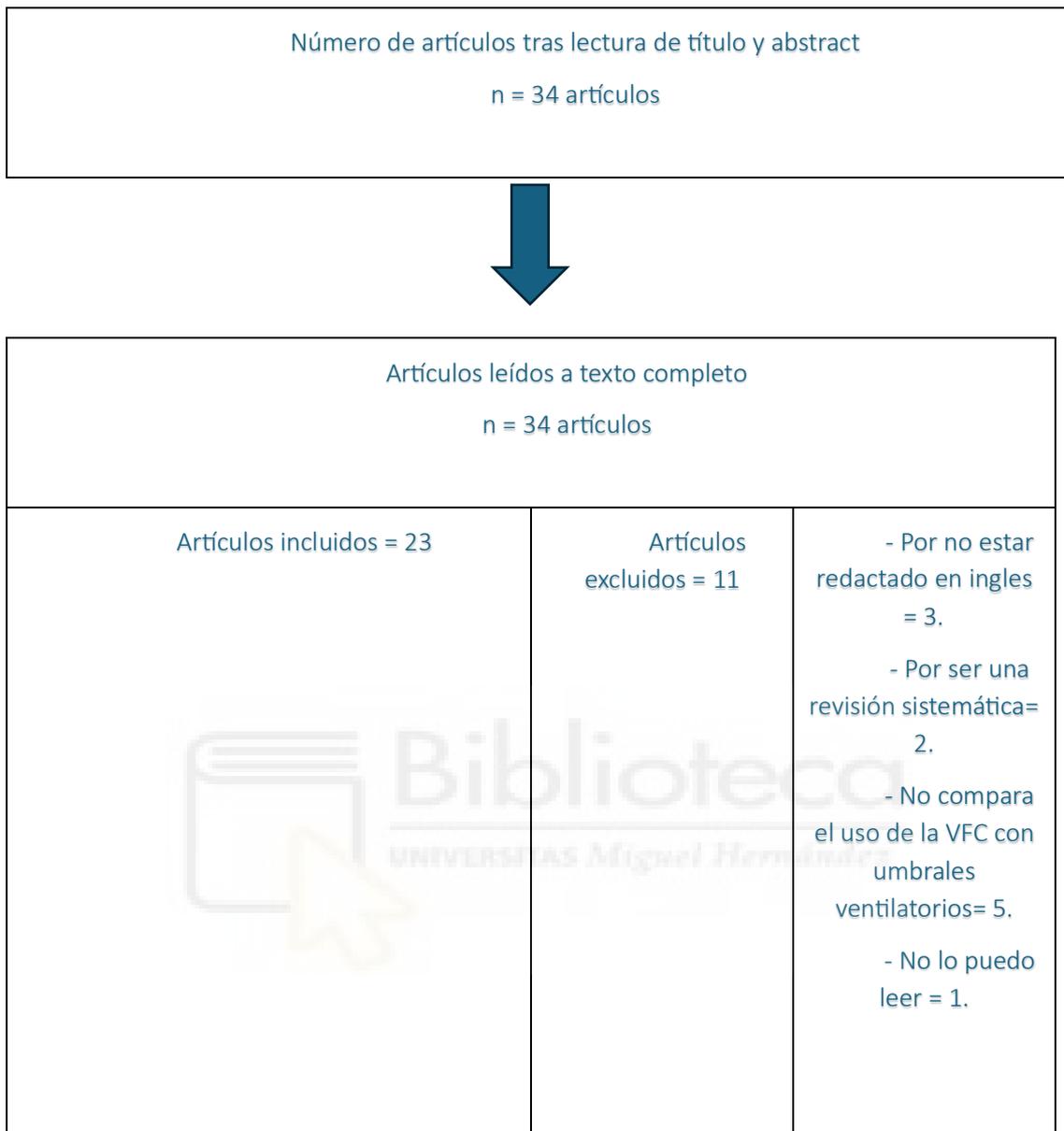


Figura 1: Diagrama de flujo de la selección de estudios incluidos en la revisión.

Tabla 1. Características de estudios incluidos y resultados.

| Autor y año | Muestra | Duración | Método | Instrumentos de evaluación | Resultados |
|--------------------------------|--|------------------------------|---|---|--|
| - Schaffarczyk., et al., 2023. | - 26 mujeres con diferentes niveles de actividad física. | - Test incremental. | - Validación de DFA-alpha1 para umbrales aeróbicos y anaeróbicos. | - DFA-alpha1. - Intercambio gaseoso, - Análisis de frecuencia cardíaca (HRV). | - Estimación precisa de umbrales mediante DFA-alpha1 como alternativa no invasiva. |
| - Ryuzaki, T., et al., 2023. | - 67 pacientes con insuficiencia cardíaca | - 4años (2014-2019). | - Análisis espectral de VFC durante un test incremental. | - ECG. - Espectro de potencia. - HRV. | - VFC en tiempo real permitió estimar el umbral anaeróbico sin necesidad de analizador de gases. |
| - Neves, L.N.S., et al., 2022. | - 34 estudiantes universitarios varones y sanos. | - 2 días (48h de intervalo). | - Comparación de los 6 umbrales (VT1/2, LT1/2, HRVT1/2). | - Cuestionarios. - Electrocardiograma. - Test de ejercicio cardiopulmonar. - Análisis de la VFC. | - HRVT2 mostro una buena correlación con LT2 y VT2, mientras que HRVT1 fue impreciso. |
| - Schüttler, J., et al., 2023. | - 21 participantes (11 hombres y 9 mujeres). Sin antecedentes médicos. | - Test incremental. | - Validar el uso de la HRV y la FR para determinar umbrales. | - Monitor de frecuencia cardíaca. - Espirometría. - Software: Kubios HRV premium. | - La combinación de HRV y FR mostro una mayor precisión para determinar los umbrales ventilatorios |

| | | | | | |
|---------------------------------|--|---|--|---|---|
| | | | | | que si se realizaban por separado. |
| - Sempere-Ruiz N., et al., 2024 | - 16 adultos jóvenes (13 hombres y 3 mujeres) Físicamente activos y sin problemas de salud. | - Dos pruebas de esfuerzo incremental en un cicloergómetro y separados en el tiempo una semana. | - Validar el uso del índice no lineal DFA-alpha1 para determinar umbrales aeróbico y anaeróbico a través de HRV. | - Monitoreo de la frecuencia cardiaca. - Software Kubios HRV. - Cicloergómetro. - Analizador de gases. | - DFA-alpha1, ofreciendo una alternativa no invasiva a los métodos tradicionales. - DFA-alpha1 mostro una validez significativa para detectar VT1. |
| - Zimatore G., et al., 2021. | - 30 sujetos (28 hombres y 2 mujeres). - 8 remeros profesionales, 8 remeros recreativos y 14 de deportes recreativos. | - Test incremental. | - Validar el uso Análisis RQA aplicado a HRV para detectar umbrales ventilatorios en deportistas. | - Cicloergómetro. - Analizador de gases. - Cinturón pectoral para medir la FC. - Medidas antropométricas. - Software para el análisis de VFC con RQA. | - RQA de la HRV detecto con precisión VT1 y VT2. |
| - Mateo-march M., et al., 2022. | - 38 ciclistas de resistencia de élite masculinos. | - Test incremental. | - Validar DFA-alpha1 para determinar los umbrales de intensidad en comparación con el lactato. | - Cicloergómetro. - Analizador portátil de lactato. - Polar H10. | - DFA-alpha1 = 0.75 correlaciono con LT1 y DFA-alpha1 = 0.5 fueron valores diferentes, pero mostraron altos |

| | | | | | |
|------------------------------|---|---------------------|---|--|--|
| | | | | - Software Kubios. | niveles de correlación y concordancia con LT2. |
| - Kanninen M., et al., 2023. | -15 participantes sanos de edades entre 22 y 44 años. | - Test incremental. | - Análisis DDFA para estimar umbrales. | - Polar H10. - Analizador de gases. - Medidor de lactato. - Software Kubios. | - El DDFA proporciona un método sencillo, rentable y preciso basado en la frecuencia cardíaca para evaluar los umbrales |
| - Rogers B., et al., 2021. | -17 participantes sanos de edades entre 19 y 52 años. | - Test incremental. | - Validación de DFA-alpha1 en una rampa progresiva. | - Cinta de correr. -Analizador de gases. - Polar H7. - Software Kubios. | - El uso de la actividad del DFA a1 puede orientar sobre un límite de zona de entrenamiento bajo válido sin necesidad de intercambio gaseoso ni análisis de lactato sanguíneo. |
| - Rogers B., et al., 2021. | - 16 participantes con insuficiencia cardíaca de edades entre 41 y 70 años. | - Test incremental. | - Explorar si HRVT derivado de DFA-alpha1 se corresponde con el VT1 basado en el intercambio de gases en una población con un espectro de enfermedad cardíaca | - Cicloergómetro. - Analizador de gases. - Electrocardiograma. - Software Kubios. | - DFA-alpha1 está estrechamente relacionado con el primer umbral ventilatorio en un grupo de individuos con insuficiencia cardíaca congestiva o |

| | | | | | |
|-----------------------------------|--|---------------------|--|---|--|
| | | | | | enfermedad vascular isquémica |
| - Stergiopoulos C., et al., 2020. | - 17 futbolistas sanos de 22 años. | - Test incremental. | - Explorar el segundo umbral ventilatorio mediante diferentes índices de variabilidad de la frecuencia cardíaca durante la prueba de carrera de ida y vuelta en varias etapas. | - Mp3 en un ordenador. - Analizador de gases. - Electrocardiograma. - Software Kubios. | - Los resultados sugirieron que la respiración derivada del ECG (EDR) y el producto de alta frecuencia (HF) pueden ser dos índices de variabilidad de la frecuencia cardíaca para determinar el segundo umbral ventilatorio (VT2). |
| - Rogers B., et al., 2021. | - 17 corredores recreativos de edades comprendidas entre 19 y 52 años. | - Test incremental. | - Examinar si DFA a1, un índice HRV de propiedades de correlación fractal exhibiría un patrón no correlacionado en el AnT derivado de datos de intercambio de gases, | - Cinta de correr. - Analizador de gases. - Polar H7. - Software Kubios. | - Demostró que el segundo umbral ventilatorio estaba estrechamente relacionado con la frecuencia cardíaca asociada a un DFA a1 de 0,5 en una población de atletas recreativos. |
| - Rogers B., et al., 2022. | - 9 triatletas (7hombres y 2 | - Test incremental. | - Este estudio tuvo como objetivo confirmar la asociación | - Cicloergómetro. - Polar H10. | - El umbral de variabilidad de la frecuencia cardíaca |

| | | | | | |
|------------------------------------|---|---------------------|--|--|---|
| | mujeres) nivel nacional e internacional | | del HRVT basado en DFA a1 con el de LT1, | - Analizador portátil de lactato. - Software Kubios. | basado en el DFA a1, se asoció estrechamente con el primer umbral de lactato en una población de triatletas de élite, hombres y mujeres, durante una prueba de ciclismo en rampa. |
| - Da cruz, C. J. G., et al., 2021. | - 61 mujeres sanas y que tomaran anticonceptivos orales. De una edad promedio de 24 años. | - Test incremental. | - Este estudio investigó el grado de concordancia entre el VT y cuatro métodos independientes para evaluar la HRVT en mujeres. | - Cinta de correr. - CPX. - Polar v800. - Software Kubios. | - La HRVT se perfiló como una alternativa práctica y no invasiva para la determinación del VT. |
| - Van Hooren, B., et al., 2023. | - 29 participantes (24 hombres y 5 mujeres) | - Test incremental. | - Este estudio tuvo como objetivo investigar la concordancia entre el VT1 de intercambio gaseoso y el HRVT basado en el cinturón pectoral DFA-a1 | - Mascarilla (Hans Rudolph Inc, Shawnee, KS, EE. UU.). - Polar H10. - Cinta de correr. | - DFA-a1 de 0,75 durante una rampa de ejercicio incremental estaba estrechamente relacionado con el VT1 de intercambio de gases, con una precisión a nivel individual comparable a la de otros métodos para la determinación del VT1. |

| | | | | | |
|--|---|----------------------------|--|---|--|
| <p>- Fleitas-Paniagua, P. R., et al., 2023</p> | <p>- 10 mujeres y 11 hombres de edades comprendidas entre 18 y 52 años. Además de ser deportistas recreativos y sanos.</p> | <p>- Test incremental.</p> | <p>- Comprobar si el uso de HHb y HRV sirve como alternativa a los gold estándar para detectar los umbrales.</p> | <p>- Cicloergómetro. - Analizador de gases. - Polar H10.</p> | <p>- Los resultados proporcionan evidencia adicional que respalda el uso de la [HHb] Presión arterial y el HRVT2.</p> |
| <p>- Thiart, N., et al., 2023.</p> | <p>- 10 atletas de media y larga distancia de una edad media de 23 años y 11 ciclistas del equipo de ciclismo de desarrollo continental africano, de una edad media de 21 años.</p> | <p>- Test incremental.</p> | <p>- El objetivo principal del estudio fue determinar si los umbrales establecidos por la VFC se pueden utilizar para estimar con precisión el VT.1, RCP y LT2 de atletas de resistencia.</p> | <p>- Espirometría. - Cicloergómetro. - Cinta de correr.</p> | <p>- Los resultados del estudio verificaron la precisión y validez del uso del VT1 SD1 y VT1 RMSSD para determinar las potencias absolutas de ciclistas entrenados en resistencia y atletas de media y larga distancia en el VT1</p> |
| <p>- Sheoran, S., et al., 2024.</p> | <p>- 37 participantes (20 hombres y 17 mujeres)</p> | <p>- Test incremental.</p> | <p>- Este estudio examinó la confiabilidad test-retest de los umbrales de DFA-α1 y su concordancia con los umbrales de ejercicio ventilatorios y derivados del lactato en hombres y mujeres.</p> | <p>- Analizador de lactato enzimático-amperométrico. - Analizador de gases. - Cinta de correr. - Polar H10.</p> | <p>- DFA-α1 mostró una alta concordancia con los VT desde una perspectiva de umbral estadístico, podría utilizarse potencialmente como una medida práctica para clasificar las zonas de intensidad</p> |

| | | | | | |
|----------------------------------|---|---------------------|--|---|---|
| | | | | | individualizadas. Sin embargo, su validez para representar los umbrales aeróbicos o anaeróbicos es cuestionable. |
| - Gronwald, T., et al., 2024. | - 21 atletas de resistencia (11 hombres y 9 mujeres). | - Test incremental. | - Validación de DFA- α 1 como delimitador de zonas de entrenamiento. | - Analizador de gases. - Medidor de lactato. - Polar H10. - Cinta de correr. - Software Kubios. | - DFA- α 1 es útil para estimar las zonas de entrenamiento, pero tiene menos precisión en transiciones rápidas de intensidad. |
| - Alikhani, I., et al., 2022. | - 24 participantes varones sanos. | - Test incremental. | - El objetivo del estudio es determinar un modelo para estimar el VT2 mediante la VFC en una prueba de ejercicio máxima. | - Cinta de correr. - Espirometría. - Polar RS800. | - Alta correlación entre HRVT y VT2. |
| - Ikura, H., et al., 2022. mi | -28 pacientes con enfermedad cardiovascular realizaron terapia de ejercicios entre agosto de 2018 y febrero de 2020 | - Test incremental. | - Observar si la VFC sirve para determinar umbrales para personas con enfermedad cardiovascular. | - Electrográfico portátil. - Analizador de gases. - Cicloergómetro. | - Se observa que la VFC podría facilitar la prescripción de ejercicio aeróbico sin necesidad de un analizador de gases respiratorios en pacientes con |

| | | | | | |
|-------------------------------|--|-------------------------|--|--|---|
| | | | | | enfermedad cardiovascular. |
| - Gronwald, T., et al., 2021. | - Ex triatleta olímpico, hombre de 41 años | - 3 pruebas diferentes. | - Evaluación práctica del DFA- α 1 en pruebas incrementales de campo. | - Cicloergómetro. - Polar h10. - Software Kubios. | - DFA- α 1 sirve para monitorizar las zonas de entrenamiento en condiciones reales. |
| - Rogers, B., et al., 2023. | - 21 participantes sanos (11 hombres y 9 mujeres). | - Test incremental. | - Estimación del VT2 mediante HRV (ECG derivado de la respiración) | - ECG portátil. - Analizador de gases. - Cinta de correr. - Test MSRT. - Espectro HRV. | Alta correlación entre HRV y VT2 mediante (ECG-DR: 0.94 Por lo tanto, método válido para estimar VT2. |

VFC = Variabilidad de la frecuencia cardiaca; ECG = Electrocardiograma; HRV: Heart rate variability; HRVT1 = Heart rate at ventilatory threshold 1; HRVT2 = Heart rate at ventilatory threshold 2; VT1 = Umbral ventilatorio 1; VT2 = Umbral ventilatorio 2; LT1 = Lactate threshold 1; LT2 = Lactate threshold 2; FR = Frecuencia respiratoria; RQA = análisis de cuantificación de recurrencias; DDFA = Análisis de fluctuación dinámico sin tendencia; HF = Alta frecuencia; EDR = ECG derivado de la respiración; AnT = Anaerobic threshold; VT = Umbral ventilatorio; HHb = Hemoglobina desoxigenada; RCP = Respiratory compensation point; MSRT = Multiple shuttle run test; CPX = Prueba de ejercicio cardiopulmonar.

Discusión

Este trabajo tuvo como objetivo el analizar si la variabilidad de la frecuencia cardiaca (VFC) sirve como una herramienta para detectar los umbrales fisiológicos, comparándolo con el *gold standar* el intercambio de gases o con la medición del lactato. La presente revisión sistemática incluyó artículos comprendidos entre (2020-2025) que emplearon diferentes enfoques no invasivos basados en la VFC. Estos mostraron resultados muy favorables para su aplicación práctica, en concreto en índice DFA- $\alpha 1$.

Este parámetro, evalúa las propiedades fractales de las series de intervalos RR, la cual se ha mostrado sensible a los cambios en la carga de ejercicio. Estudios como los de (Sempere-Ruiz et al., 2024) (Van Hooren et al., 2023) y (Mateo-March et al., 2022) han validado el uso de un valor umbral en torno a 0.75 de DFA- $\alpha 1$ para detectar el primer umbral ventilatorio (VT1), validando el uso de esta métrica en protocolos incrementales y observando así correlaciones significativas con los resultados obtenidos con el intercambio de gases. Estos resultados refuerzan los trabajos pioneros de Rogers et al. (2021), que proponen dicho valor de corte para diferenciar entre el ejercicio de baja y moderada intensidad. En cambio, el umbral relacionado con 0.5 de DFA- $\alpha 1$ ha mostrado asociación con el VT2 en varias investigaciones (Rogers et al., 2021) y (Fleitas-Paniagua et al., 2023) pero se ha evidenciado que la relación ha sido menos consistente. Por lo tanto, se propone este método como una alternativa eficaz en contextos donde los recursos son limitados.

El uso de otros enfoques, como el análisis de cuantificación de recurrencias (RQA), también han mostrado resultados muy prometedores. (Zimatore et al., 2021) validó esta metodología como una alternativa para estimar umbrales ventilatorios a partir de la VFC, confirmado así la utilización de este indicador fisiológico. Además, técnicas basadas en dinámica fractal o espectros de alta frecuencia también aporta evidencia relevante (Kanniainen et al., 2023) y (Schaffarczyk et al., 2023)

Además, aunque mucha de la literatura encontrada y revisada se enfoca a la población deportista, estudios como el de (Ryuzaki et al., 2023) y (Rogers et al., 2021) exploran la viabilidad del DFA- $\alpha 1$ en pacientes con insuficiencia cardiaca, demostrando que es posible identificar umbrales fisiológicos relevantes a métodos invasivos, esto muestra que la aplicación de estas métricas también es viable y segura en poblaciones con insuficiencia cardiaca. Asimismo, (Ikura et al., 2022) estudiaron su utilidad con personas con enfermedades cardiovasculares, reafirmando que esta herramienta puede extrapolarse a contextos donde la evaluación de la intensidad del ejercicio es crítica para la seguridad del paciente. Esto respalda que su uso no solo sirve para la optimización del rendimiento, sino que también para la prescripción segura del ejercicio con población de riesgo.

Debe recalarse que existen variaciones metodológicas entre estudios, como el tipo de protocolo incremental, la duración de los estadios, la población evaluada o el dispositivo para registrar la VFC. Además de factores como la fatiga, la deshidratación, el estrés o los errores a la hora de la recogida de datos pueden influir negativamente en la precisión de esta herramienta. Pero a pesar de estas diferencias, los resultados muestran una gran validez con el DFA- $\alpha 1$.

No obstante, debemos señalar que existen ciertas limitaciones metodológicas, ya que la mayoría de los estudios incluidos presentan diseños observacionales, sin grupos de control ni aleatorización, lo cual se refleja en las puntuaciones de la escala PEDro. Aunque esto no invalida los hallazgos, ya que los estudios de validación tienen otros objetivos metodológicos, centrados en la sensibilidad, especificidad y correlación de herramientas indirectas con el método de referencia.

Conclusiones

Para concluir, esta revisión sistemática confirma que la VFC, y en especialmente el índice de DFA- $\alpha 1$, es una herramienta útil, práctica y válida para la estimación de los umbrales

fisiológicos tanto en deportistas como en poblaciones con problemas cardiacos. Además, el uso de la VFC puede servir como alternativa al análisis de gases o a las pruebas de lactato a la hora de individualizar la carga de entrenamiento, incluso fuera del entorno del laboratorio. Si que existe ciertas diferencias entre algunos estudios y diferentes protocolos a la hora de medir, pero esta revisión respalda la validez del DFA- α 1 para delimitar las zonas de entrenamiento. Por último, la accesibilidad a esta metodología la convierte en una herramienta prometedora para individualizar el entrenamiento y mejorar la monitorización de la carga de trabajo.

Propuesta de intervención

La discusión de esta revisión sistemática ha demostrado que el parámetro DFA- α 1 de la VFC es un parámetro muy eficaz para detectar los umbrales fisiológicos en deportistas, sin necesidad de utilizar métodos tradicionales como pueden ser el análisis de lactato o el intercambio de gases. Sin embargo, la mayoría de los estudios incluidos presentan un diseño observacional con recogida de datos puntuales. Además de no incluir un seguimiento longitudinal que permita validar la estabilidad de los umbrales determinados por la VFC en diferentes fases de carga de entrenamiento.

El objetivo con esta propuesta de intervención es evaluar la estabilidad y la precisión del índice DFA- α 1 como herramienta de monitorización de los umbrales fisiológicos durante un microciclo de entrenamiento de resistencia en ciclistas, comparándolo así los cambios fisiológicos de rendimiento entre tres tipos de carga.

Los participantes deberán tener al menos 2 años de experiencia en entrenamiento. Dividiremos a los participantes en tres grupos, un grupo control que mantendrá la carga de entrenamiento de su anterior microciclo, un grupo con sobrecarga que tendrá un aumento del 20% respecto a su carga de microciclo previo y un grupo de recuperación donde reduce su carga un 20% de su microciclo previo.

La duración será de 4 semanas:

Semana 1 familiarización y test inicial.

En esta primera semana los participantes se familiarizarán con los dispositivos que vamos a utilizar a la hora de medirlo y entrenarlos y después pasaremos a realizarle un test incremental en un cicloergómetro para determinar VT1 Y VT2 mediante DFA- α 1 y lactato.

Semana 2 y 3 intervención.

En las siguientes dos semanas cada grupo aplicará el macrociclo correspondiente y esos entrenamientos estarán monitorizados continuamente.

Semana 4 retest.

En la última semana repetiremos la prueba incremental para comprobar si los resultados obtenidos en el test inicial son los mismos o no después de un periodo de entrenamiento.

Con esta intervención buscamos variables que nos afirmen si existe cambios en la intensidad por carga interna o carga externa en la que se alcanza el valor de DFA- α 1 al inicio y al final del microciclo y comparar la correlación entre DFA- α 1 y umbrales determinados por lactato obtenidos en los tests.

Bibliografía

- Alikhani, I., Noponen, K., Tulppo, M., Peltonen, J., Lehtonen, E., & Seppanen, T. (2022b). Heart Rate Variability and its Association with Second Ventilatory Threshold Estimation in Maximal Exercise Test. *2022 44th Annual International Conference Of The IEEE Engineering In Medicine & Biology Society (EMBC)*, 139-142. <https://doi.org/10.1109/embc48229.2022.9871913>
- Aspetar Sports Medicine Journal - Part 1: *Monitoring training status with player-tracking technology*. (s. f.). <https://journal.aspetar.com/en/archive/volume-7-targeted-topic-football-revolution/part-1-monitoring-training-status-with-player-tracking-technology>
- Buchheit, M., & Gindre, C. (2006). Cardiac parasympathetic regulation: respective associations with cardiorespiratory fitness and training load. *AJP Heart And Circulatory Physiology*, 291(1), H451-H458. <https://doi.org/10.1152/ajpheart.00008.2006>
- Da Cruz, C. J. G., Porto, L. G. G., & Molina, G. E. (2021b). Agreement between the Heart Rate Variability Threshold and Ventilatory Threshold in Young Women: Impact of Cardiac Parasympathetic Status and Cardiorespiratory Fitness. *Measurement In Physical Education And Exercise Science*, 26(3), 179-190. <https://doi.org/10.1080/1091367x.2021.1979980>
- Díaz, B. B., Sánchez, J. J. A., & De León, A. C. (2013). Frecuencia cardiaca en reposo y enfermedad cardiovascular. *Medicina Clínica*, 143(1), 34-38. <https://doi.org/10.1016/j.medcli.2013.05.034>
- Fleitas-Paniagua, P. R., De Almeida Azevedo, R., Trpcic, M., Murias, J. M., & Rogers, B. (2023). Combining Near-Infrared Spectroscopy and Heart Rate Variability Derived Thresholds to Estimate the Critical Intensity of Exercise. *The Journal Of Strength And Conditioning Research*, 38(1), e16-e24. <https://doi.org/10.1519/jsc.0000000000004597>
- Ford, C. N., Slining, M. M., & Popkin, B. M. (2012). Trends in Dietary Intake among US 2- to 6-Year-Old Children, 1989-2008. *Journal Of The Academy Of Nutrition And Dietetics*, 113(1), 35-42. e6. <https://doi.org/10.1016/j.jand.2012.08.022>
- Gronwald, T., Berk, S., Altini, M., Mourot, L., Hoos, O., & Rogers, B. (2021b). Real-Time Estimation of Aerobic Threshold and Exercise Intensity Distribution Using Fractal Correlation Properties of Heart Rate Variability: A Single-Case Field Application in a Former Olympic Triathlete. *Frontiers In Sports And Active Living*, 3. <https://doi.org/10.3389/fspor.2021.668812>
- Gronwald, T., Horn, L., Schaffarczyk, M., & Hoos, O. (2024). Correlation properties of heart rate variability for exercise prescription during prolonged running at constant speeds: A randomized cross-over trial. *European Journal Of Sport Science*. <https://doi.org/10.1002/ejsc.12175>
- Halson, S. L. (2014). Monitoring Training Load to Understand Fatigue in Athletes. *Sports Medicine*, 44(S2), 139-147. <https://doi.org/10.1007/s40279-014-0253-z>
- Ikura, H., Katsumata, Y., Seki, Y., Ryuzaki, T., Shiraishi, Y., Miura, K., Sato, K., & Fukuda, K. (2022). Real-time analysis of heart rate variability during aerobic exercise in patients with cardiovascular disease. *IJC Heart & Vasculature*, 43, 101147. <https://doi.org/10.1016/j.ijcha.2022.101147>
- Jamnick, N. A., Pettitt, R. W., Granata, C., Pyne, D. B., & Bishop, D. J. (2020). An Examination and Critique of Current Methods to Determine Exercise Intensity. *Sports Medicine*, 50(10), 1729-1756. <https://doi.org/10.1007/s40279-020-01322-8>
- Javaloyes, A., Sarabia, J. M., Lamberts, R. P., & Moya-Ramon, M. (2018). Training Prescription Guided by Heart-Rate Variability in Cycling. *International Journal Of Sports Physiology And Performance*, 14(1), 23-32. <https://doi.org/10.1123/ijspp.2018-0122>

- Kanniainen, M., Pukkila, T., Kuisma, J., Molkkari, M., Lajunen, K., & Räsänen, E. (2023b). Estimation of physiological exercise thresholds based on dynamical correlation properties of heart rate variability. *Frontiers In Physiology*, 14. <https://doi.org/10.3389/fphys.2023.1299104>
- Lakusic, N., Mahovic, D., Kruzliak, P., Habek, J. C., Novak, M., & Cerovec, D. (2015). Changes in Heart Rate Variability after Coronary Artery Bypass Grafting and Clinical Importance of These Findings. *BioMed Research International*, 2015, 1-7. <https://doi.org/10.1155/2015/680515>
- Malik, M., Bigger, J. T., Camm, A. J., Kleiger, R. E., Malliani, A., Moss, A. J., & Schwartz, P. J. (1996b). Heart rate variability: Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. *European Heart Journal*, 17(3), 354-381. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.eurheartj.a014868>
- Mateo-March, M., Moya-Ramón, M., Javaloyes, A., Sánchez-Muñoz, C., & Clemente-Suárez, V. J. (2022). Validity of detrended fluctuation analysis of heart rate variability to determine intensity thresholds in elite cyclists. *European Journal Of Sport Science*, 23(4), 580-587. <https://doi.org/10.1080/17461391.2022.2047228>
- Moya-Ramon, M., Mateo-March, M., Peña-González, I., Zabala, M., & Javaloyes, A. (2022). Validity and reliability of different smartphones applications to measure HRV during short and ultra-short measurements in elite athletes. *Computer Methods And Programs In Biomedicine*, 217, 106696. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2022.106696>
- Neves, L. N. S., Neto, V. H. G., Araujo, I. Z., Barbieri, R. A., Leite, R. D., & Carletti, L. (2022). Is There Agreement and Precision between Heart Rate Variability, Ventilatory, and Lactate Thresholds in Healthy Adults? *International Journal Of Environmental Research And Public Health*, 19(22), 14676. <https://doi.org/10.3390/ijerph192214676>
- Plews, D. J., Laursen, P. B., Stanley, J., Kilding, A. E., & Buchheit, M. (2013). Training Adaptation and Heart Rate Variability in Elite Endurance Athletes: Opening the Door to Effective Monitoring. *Sports Medicine*, 43(9), 773-781. <https://doi.org/10.1007/s40279-013-0071-8>
- Plews, D. J., Scott, B., Altini, M., Wood, M., Kilding, A. E., & Laursen, P. B. (2017). Comparison of Heart-Rate-Variability Recording With Smartphone Photoplethysmography, Polar H7 Chest Strap, and Electrocardiography. *International Journal Of Sports Physiology And Performance*, 12(10), 1324-1328. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2016-0668>
- Pumprla, J., Howorka, K., Groves, D., Chester, M., & Nolan, J. (2002). Functional assessment of heart rate variability: physiological basis and practical applications. *International Journal Of Cardiology*, 84(1), 1-14. [https://doi.org/10.1016/s0167-5273\(02\)00057-8](https://doi.org/10.1016/s0167-5273(02)00057-8)
- Rogers, B., Giles, D., Draper, N., Hoos, O., & Gronwald, T. (2021b). A New Detection Method Defining the Aerobic Threshold for Endurance Exercise and Training Prescription Based on Fractal Correlation Properties of Heart Rate Variability. *Frontiers In Physiology*, 11. <https://doi.org/10.3389/fphys.2020.596567>
- Rogers, B., Mourot, L., & Gronwald, T. (2021b). Aerobic Threshold Identification in a Cardiac Disease Population Based on Correlation Properties of Heart Rate Variability. *Journal Of Clinical Medicine*, 10(18), 4075. <https://doi.org/10.3390/jcm10184075>
- Rogers, B., Giles, D., Draper, N., Mourot, L., & Gronwald, T. (2021f). Detection of the Anaerobic Threshold in Endurance Sports: Validation of a New Method Using Correlation Properties of Heart Rate Variability. *Journal Of Functional Morphology And Kinesiology*, 6(2), 38. <https://doi.org/10.3390/jfmk6020038>

- Rogers, B., Berk, S., & Gronwald, T. (2022b). An Index of Non-Linear HRV as a Proxy of the Aerobic Threshold Based on Blood Lactate Concentration in Elite Triathletes. *Sports*, 10(2), 25. <https://doi.org/10.3390/sports10020025>
- Rogers, B., Schaffarczyk, M., & Gronwald, T. (2023b). Improved Estimation of Exercise Intensity Thresholds by Combining Dual Non-Invasive Biomarker Concepts: Correlation Properties of Heart Rate Variability and Respiratory Frequency. *Sensors*, 23(4), 1973. <https://doi.org/10.3390/s23041973>
- Rosales-Soto, G., Corsini-Pino, R., Monsálves-Álvarez, M., & Yáñez-Sepúlveda, R. (2016). Respuesta del balance simpático-parasimpático de la variabilidad de la frecuencia cardíaca durante una semana de entrenamiento aeróbico en ciclistas de ruta. *Revista Andaluza de Medicina del Deporte*, 9(4), 143-147. <https://doi.org/10.1016/j.ramd.2015.07.002>
- Ryuzaki, T., Shiraishi, Y., Miura, K., Ikura, H., Seki, Y., Azuma, K., Sato, K., Fukuda, K., & Katsumata, Y. (2023). Real-Time Estimation of Anaerobic Threshold during Exercise Using Electrocardiogram in Heart Failure Patients. *Journal Of Clinical Medicine*, 12(16), 5225. <https://doi.org/10.3390/jcm12165225>
- Schaffarczyk, M., Rogers, B., Reer, R., & Gronwald, T. (2022b). Validation of a non-linear index of heart rate variability to determine aerobic and anaerobic thresholds during incremental cycling exercise in women. *European Journal Of Applied Physiology*, 123(2), 299-309. <https://doi.org/10.1007/s00421-022-05050-x>
- Schmitt, L., Regnard, J., & Millet, G. P. (2015). Monitoring Fatigue Status with HRV Measures in Elite Athletes: ¿An Avenue Beyond RMSSD? *Frontiers In Physiology*, 6. <https://doi.org/10.3389/fphys.2015.00343>
- Sempere-Ruiz, N., Sarabia, J. M., Baladzhaeva, S., & Moya-Ramón, M. (2024). Reliability and validity of a non-linear index of heart rate variability to determine intensity thresholds. *Frontiers In Physiology*, 15. <https://doi.org/10.3389/fphys.2024.1329360>
- Sheoran, S., Stavropoulos-Kalinoglou, A., Simpson, C., Ashby, M., Webber, E., & Weaving, D. (2024). Exercise intensity measurement using fractal analysis of heart rate variability: Reliability, agreement and influence of sex and cardiorespiratory fitness. *Journal Of Sports Sciences*, 42(21), 2012-2020. <https://doi.org/10.1080/02640414.2024.2421691>
- 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>
- Thiart, N., Coetzee, B., & Bisschoff, C. (2023b). Heart Rate Variability-Established Thresholds to Determine the Ventilatory and Lactate Thresholds of Endurance Athletes. *International Journal Of Human Movement And Sports Sciences*, 11(2), 398-410. <https://doi.org/10.13189/saj.2023.110217>
- Van Hooren, B., Mennen, B., Gronwald, T., Bongers, B. C., & Rogers, B. (2023). Correlation properties of heart rate variability to assess the first ventilatory threshold and fatigue in runners. *Journal Of Sports Sciences*, 1-10. <https://doi.org/10.1080/02640414.2023.2277034>
- Vesterinen, V., Häkkinen, K., Hynynen, E., Mikkola, J., Hokka, L., & Nummela, A. (2011). Heart rate variability in prediction of individual adaptation to endurance training in recreational endurance runners. *Scandinavian Journal Of Medicine And Science In Sports*, 23(2), 171-180. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2011.01365.x>
- Zimatore, G., Falcioni, L., Gallotta, M. C., Bonavolontà, V., Campanella, M., De Spirito, M., Guidetti, L., & Baldari, C. (2021b). Recurrence quantification analysis of heart rate variability to detect

both ventilatory thresholds. *PLoS ONE*, 16(10), e0249504.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0249504>

