

DETERMINANTES FISIOLÓGICOS DE LA VELOCIDAD PICO EN EL TEST VAM-EVAL Y EL PAPEL DE LAS VARIABLES CINEMÁTICAS EN LA ECONOMÍA DE CARRERA EN TRIATLETAS

Iglesias,X¹; Fernández-Jarillo, I¹; Montraveta, J¹; Chaverri, D ¹

¹ Institut Nacional d' Educació Física de Catalunya (INEFC), Universitat de Barcelona

Artículo completo publicado en Sports (MDPI): <https://doi.org/10.3390/sports13090316>

Introducción

El rendimiento en carrera está influido por factores fisiológicos, biomecánicos y psicológicos. Desde una perspectiva fisiológica, los determinantes del rendimiento son el consumo máximo de oxígeno (VO₂max), la economía de carrera (EC) y los umbrales fisiológicos; esta tríada de factores está relacionada con la capacidad oxidativa del tejido muscular. La saturación de oxígeno muscular mínima (SmO₂min), medida mediante NIRS, se ha vinculado con un mayor rendimiento deportivo y se ha propuesto como un sustituto pragmático de la capacidad oxidativa [1]. Por otro lado, la velocidad pico (Vpeak) ha mostrado una fuerte correlación con el rendimiento en triatlón [2]. Establecer una relación entre los elementos fisiológicos mencionados (VO₂max, VT1, VT2, EC y SmO₂min) y la Vpeak es relevante ya que permitiría identificar las cualidades fisiológicas que pueden influir en el rendimiento. Además, vincular los aspectos cinemáticos de la carrera con la EC podría mejorar nuestra comprensión sobre cómo las variables cinemáticas influyen en el consumo de oxígeno asociado a la carrera. Sin embargo, estas relaciones no han sido exploradas en poblaciones de alto rendimiento ni en triatletas, y la mayoría de estudios previos se han desarrollado en condiciones de laboratorio. Para abordar estas limitaciones y generar evidencia aplicable al contexto real de entrenamiento, el objetivo principal de este estudio es evaluar cómo el VO₂max, los umbrales ventilatorios, la EC y la SmO₂min influyen en la Vpeak en triatletas de nivel nacional. El objetivo secundario es analizar el impacto de la cadencia (CAD), la longitud de zancada (LZ), la oscilación vertical (OV) y el tiempo de contacto (TC) sobre la EC en esta población.

Métodos

Once triatletas de nivel nacional (edad 24 ± 5 años; VO₂max 60.6 ± 8.2 ml·min⁻¹·kg⁻¹; grosor tejido adiposo 3.6 ± 1.5 mm; Vpeak 18.8 ± 0.8 km·h⁻¹) realizaron una prueba incremental VAM EVAL. El intercambio de gases se midió con un analizador portátil Cosmed K5 (Cosmed S.r.l, Albano Laziale, Rome, Italy), la SmO₂ se midió mediante un dispositivo NIRS de onda continua MOXY (Fortiori Design LLC, Fort Collins, CO, USA) colocado en el vasto lateral derecho. Las variables cinemáticas se midieron mediante un sensor inercial Stryd (Stryd Inc., Boulder, CO, USA) colocado en el zapato derecho. Se utilizó un método de regresión lineal múltiple por pasos para estimar las contribuciones relativas de las variables independientes: VO₂max, VT1, VT2, RE12, RE16 y SmO₂min sobre la variable dependiente (Vpeak). Los diagnósticos de colinealidad arrojaron factores de inflación de la varianza (VIF) < 2.0 y niveles de tolerancia > 0.10, lo que indicó niveles aceptables de multicolinealidad entre las variables. Para determinar la asociación entre la Vpeak y las variables fisiológicas incluidas en el análisis, se calcularon los coeficientes de correlación de Pearson (r). Este procedimiento se repitió para evaluar la asociación entre la EC y los parámetros cinemáticos.

Resultados

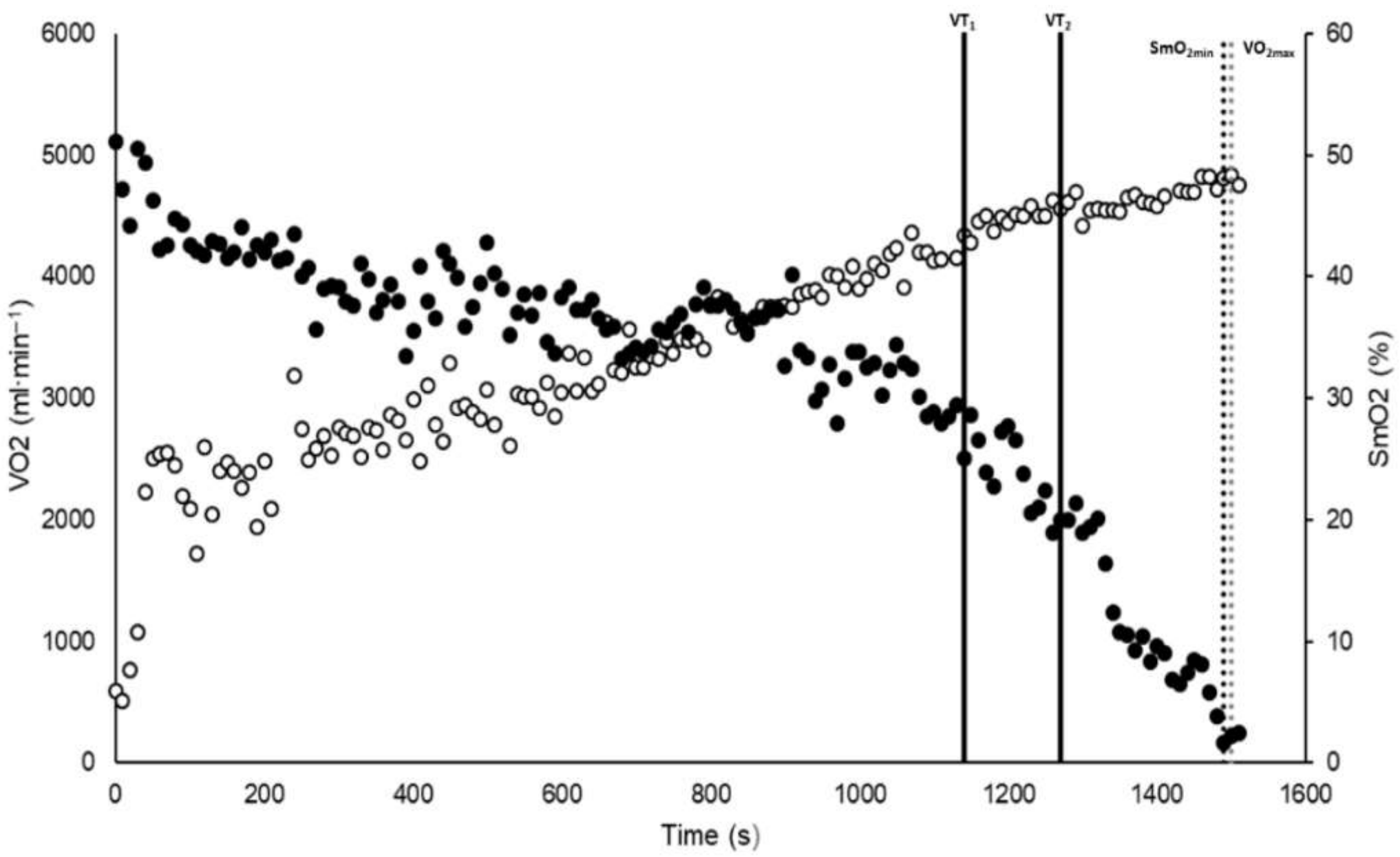
Tabla 1. Predictores del rendimiento durante la prueba incremental máxima VAM-EVAL (Vpeak): consumo máximo de oxígeno (VO₂max) y saturación de oxígeno muscular mínima (SmO₂min).

Variable dependiente	R ²	p	Indicador	β	p
Vpeak (km·h ⁻¹)	0.76	0.007	VO ₂ max (mL·min ⁻¹ ·kg ⁻¹)	0.64	0.002
	-0.68	0.020	SmO ₂ min (%)	-0.55	0.004

	r	p
EC 12 - CAD 12	0.24	0.483
EC 12 - OV 12	-0.33	0.321
EC 12 - TC 12	0.37	0.268
EC 12 - LZ 12	-0.19	0.573
EC 16 - CAD 16	0.21	0.541
EC 16 - OV 16	-0.26	0.445
EC 16 - TC 16	0.38	0.250
EC 16 - LZ 16	-0.28	0.412

Tabla 2. Coeficientes de correlación de Pearson entre la economía de carrera (EC) y las variables cinemáticas: cadencia (CAD), oscilación vertical (OV), tiempo de contacto (TC) y longitud de zancada (LZ)

Figura 1. Curso temporal representativo del consumo de oxígeno (VO₂) y la saturación de oxígeno muscular (SmO₂) durante el test VAM-EVAL en un participante. Los círculos abiertos representan el VO₂ (mL·min⁻¹, eje y izquierdo) y los círculos cerrados representan la SmO₂ (%; eje y derecho). Las líneas verticales negras continuas indican los umbrales ventilatorios VT1 y VT2, respectivamente. La línea negra discontinua señala el punto de mínima SmO₂ (SmO₂min), mientras que la línea gris discontinua indica el consumo máximo de oxígeno (VO₂max).



Discusión

La relación entre VO₂max y Vpeak observada en este estudio concuerda con la evidencia previa que muestra una alta correlación entre VO₂max y el rendimiento en carrera. La asociación entre SmO₂min y Vpeak aporta evidencia adicional de que SmO₂min se vincula con el rendimiento deportivo y podría discriminar entre niveles de desempeño [3]. No obstante, es necesario aclarar si una SmO₂min más baja refleja una mayor capacidad oxidativa junto con una mayor capacidad difusiva de O₂ (DmO₂), o si, por el contrario, indica un mayor reclutamiento de fibras glucolíticas con menor capacidad de aporte de O₂; en esencia, si obedece principalmente a una menor entrega de O₂, a una mayor demanda o a ambas. Dado que ambas variables se asocian al rendimiento, resulta clave identificar las estrategias de entrenamiento más eficaces para desarrollarlas. La evidencia actual sugiere un posible solapamiento entre los estímulos que mejoran el VO₂max y los que modulan el SmO₂min; sin embargo, especialmente para SmO₂min, se requieren estudios longitudinales adecuadamente controlados que validen su utilidad como marcador de adaptación periférica y definan las sesiones y distribuciones de intensidad más efectivas para su desarrollo.

Conclusión

El presente estudio identificó que la Vpeak fue explicada en gran medida (86%) por el VO₂max y la SmO₂min, lo que sugiere que ambas variables están fuertemente asociadas con el rendimiento en triatletas entrenados. Los resultados también respaldan la potencial utilidad de la tecnología NIRS de bajo coste, para evaluar la SmO₂min como un marcador no invasivo asociado con el rendimiento máximo y, posiblemente, la capacidad oxidativa muscular. Además, los hallazgos sugieren que las variables cinemáticas presentan una alta variabilidad interindividual y pueden no desempeñar un papel relevante en la explicación de la EC en la población estudiada.



Referencias

- Feldmann, A., et al. (2020, Feb). *Sci Rep*, 10, 3040.
- Schabort, E.J., et al. (2000, Apr). *Med Sci Sports Exerc*, 32 (4), 844-849.
- Jacobs, R.A., et al. (2011, Nov). *J Appl Physiol (1985)*, 111 (5), 1422-1430.

