

FUNDAMENTOS FISIOLÓGICOS DE LA CAPACIDAD ANAEROBIA: REVISIÓN SISTEMÁTICA

PHYSIOLOGICAL BASIS OF ANAEROBIC CAPACITY: SYSTEMATIC REVIEW

Joel Abraham Martínez González^{1*}

¹ Facultad de Ciencias de la Conducta / Cultura Física y Deporte, Universidad Autónoma del Estado de México, México.

 <https://orcid.org/0000-0002-9830-3354>

Como citar:

Martínez González, J.A. (2022). Fundamentos fisiológicos de la capacidad anaerobia: revisión sistemática. *Revista Mexicana de Ciencias de la Cultura Física*, 1(1), 1-19. DOI: 10.54167/rmccf.v1i1.901

Correspondencia: jamartinezg@uaemex.mx (Joel Abraham Martínez González)

Recibido: 17 de diciembre de 2021; Aceptado: 11 de enero de 2022

Publicado por la Universidad Autónoma de Chihuahua, a través de la Dirección de Investigación y Posgrado

RESUMEN

El máximo déficit acumulado de oxígeno (MAOD) es considerado el patrón oro para estimar la capacidad anaerobia (CAN); Pero sus dificultades metodológicas complican su estimación. Recientemente se ha propuesto un método denominado EPOCrápido+[LA-], que contempla la sumatoria entre el EPOCrápido y las concentraciones de lactato sanguíneo [LA-]. Dicho método promete ser válido, confiable y al igual que MAOD. El objetivo de la presente revisión sistemática fue recopilar información sobre el sustento fisiológico de la estimación de la CAN a través de este método. La búsqueda se realizó en las bases de datos en línea: PubMed, Redalyc y Revista CAPES, además, se apegó a las recomendaciones propuesta por PRISMA. Se incluyeron artículos sobre las bases fisiológicas que fundamenta el uso de EPOCrápido+[LA-] y los artículos que expusieron su aplicación en el campo. La base fisiológica que respalda a EPOCrápido+[LA-] como método para estimar la capacidad anaerobia se centra en la importancia del consumo de oxígeno ($\dot{V}O_2$) durante EPOCrápido ya que ese consumo es indispensable en la recuperación de las reservas de la fosfocreatina (PCr). Además, el equivalente de las [LA-] expresado en O_2 , pueden estimar la participación glucolítica en un ~50% de lo real durante el esfuerzo. Actualmente, existe evidencia para determinar que el método es sensible en detectar niveles de entrenamiento y cambios en la CAN producto del entrenamiento y/o el por el uso de ergogénicos. Por lo tanto, EPOCrápido+[LA-] puede ser empleado para estimar la bioenergética deportiva pero siempre

tomando en cuenta la complejidad matemática de su estimación.

Palabras clave: pruebas de rendimiento, ejercicio físico

SUMMARY

The maximal accumulated oxygen deficit (MAOD) is considered as the gold standard to estimate CAN. However, MAOD exhibits some methodological drawbacks which hinders its estimation and viability. Recently has been proposed an alternative method that considers the sum of the excess post exercise oxygen consumption (EPOCrápido) and the blood lactate concentrations ([LA⁻]), called EPOCrápido+[LA⁻]. This method promises to be valid, reliable, and much more viable than MAOD. Therefore, the main purpose of this systematic review was to collect information regarding the physiological and technical basis that enable the estimation of CAN through this new method. This systematic review carried out the search in the following databases: PubMed, Redalyc y Revista CAPES, besides, it followed the PRISMA recommendations. Were considered articles regarding the physiological bases, the use of EPOCrápido+[LA⁻] as a method and relevant articles due to its application on field. The physiological basis of EPOCrápido+[LA⁻] as a method to estimate CAN relies on the relationship between the phosphocreatine (PCr) recovery, the oxygen consumption ($\dot{V}O_2$) during EPOCrápido and the equivalent of [LA⁻] expressed as O_2 . Besides, is sensitive to detect different levels of training and changes in CAN using ergogenics. Thus, EPOCrápido+[LA⁻] can be used to estimate the bioenergetics of sports. However, special attention should be played into the mathematical procedures used in its estimation.

Keywords: performance test, physical exercise.

INTRODUCCIÓN

Uno de los grandes aportes a la fisiología del ejercicio fue hecho por Krogh y Lindhard (1920) quienes observaron que el consumo de oxígeno ($\dot{V}O_2$) no incrementaba de forma inmediata después de iniciar el ejercicio, sino, por el contrario, su aumento era gradual hasta alcanzar su estado estable. Dichas observaciones derivaron en dos líneas de investigación dentro de la bioenergética. La primera es sobre el comportamiento del $\dot{V}O_2$ (Hale, 2008; Wasserman et al., 2011) y la segunda sobre el déficit de O_2 y la deuda de O_2 (Maragaria et al., 1933; di Prampero et al., 1973). Los estudios de la primera línea, centrados más en la producción de energía por vías mitocondriales, han creado tecnología válida y confiable para medir el $\dot{V}O_2$ de una forma relativamente simple. Este avance ha impactado en el entendimiento científico del propio $\dot{V}O_2$ y de igual forma en la práctica del entrenamiento deportivo. La segunda vertiente inclinada a determinar la contribución de vías no mitocondriales de producción de energía no ha conseguido mediciones tan certeras ni precisas en condiciones de laboratorio y mucho menos en mediciones de campo. La medición de esta vía metabólica es más compleja y está integrada por dos sistemas de producción de energía: a) la energía que proviene de la interacción entre la fosfocreatina (PCr) y el difosfato de adenosina (ADP) es decir energía anaerobia aláctica (E_{PCr}), y b) la energía que proviene de la glucólisis anaerobia denominada anaerobia láctica ($E_{[La]}$) la cual es acompañada de la producción

de lactato y una excesiva liberación de iones hidrogeno (H^+). Dichas vías metabólicas comparten ciertas características, como ejemplo: las reacciones químicas de ambas se llevan a cabo en el citoplasma, no requieren de la interacción del O_2 y emplean múltiples enzimas que aceleran las reacciones bioquímicas a fin de dotar a los músculos con la energía necesaria para contraerse (Scott, 2005). Al integrar ambas vías, E_{PCr} y $E_{[La]}$, obtenemos la capacidad anaerobia (CAN), la cual, ha sido definida como la máxima cantidad de ATP que puede ser producida durante esfuerzos supra máximos (Gastin & Green, 1994).

Sobre los métodos de estimación de la CAN, Medbø et al. (1988), tomaron el concepto de déficit de O_2 para proponer una estimación de la producción energética por estas vías. Los autores asumieron que la CAN podía ser representada por la diferencia entre la demanda de O_2 (establecida a través de una relación lineal) y el $\dot{V}O_2$ acumulado durante un ejercicio a una intensidad supra máxima (p. ej. esfuerzos > 100% de la de la intensidad asociada al consumo de oxígeno máximo ($i\dot{V}O_{2max}$)) (fig. 1). Dicho método fue denominado máximo déficit acumulado de oxígeno (MAOD). Estimar CAN a través de MAOD implica diez visitas al laboratorio para establecer la regresión lineal entre la intensidad de los esfuerzos submáximos y el $\dot{V}O_2$ correspondiente a dicha intensidad. Los esfuerzos submáximos deben oscilar entre 30% y el 90% de la $i\dot{V}O_{2max}$ y el tiempo de cada esfuerzo debe ser suficiente (p. ej. > 6 minutos) para evitar interpretar mal el consumo a causa del componente lento observado $\dot{V}O_2$ (Noordhoof et al., 2010).



Desde entonces, MAOD es considerado el padrón oro para estimar la CAn. Sin embargo, tantas visitas al laboratorio lo tornan inconveniente para estudios académicos e inviable en la práctica.

Por otro lado, Margaría et al. (1933) y di Prampero et al. (1973) se enfocaron en entender el significado fisiológico de la deuda de O_2 (o consumo excesivo de oxígeno post ejercicio (EPOC)). Observaron que dicha deuda está constituida por un descenso subdividido en dos fases: la fase rápida (EPOC_{rápido}) y la fase lenta. La fase rápida es la de mayor relevancia fisiológica ya que la cinética $\dot{V}O_2$ al inicio del ejercicio y al final presenta un comportamiento semejante asimétrico (Whipp & Özyner, 1998). Y también a que la cinética de la recuperación de la PCr es inversa a la cinética del $\dot{V}O_2$ durante esta deuda. Por lo tanto, se infiere que el O_2 respirado en durante la deuda se debe a la recuperación de PCr que posiblemente fue empleada en la producción de ATP al inicio del ejercicio (Korzeniewski & Zoladz, 2013). Para su estimación fue necesario crear un modelo matemático biexponencial donde el primer exponente representa EPOC_{rápido} y el segundo exponente la fase lenta (Katch, 1973; Roberts & Morton, 1978; Rossiter et al., 2011) (Fig. 2). Para el caso de la energía proveniente de la vía $E_{[La]}$ di Prampero et al. (1978; 1981) observaron una relación lineal entre el O_2 y la acumulación de lactato en el musculo, siendo 1 mmol^{-1} de lactato equivalentes a $3 \text{ mL } O_2/\text{kg}^{-1}$ de peso corporal. Este equivalente complementó las estimaciones de la contribución de energía por la vía anaerobia y más tarde en un estudio similar al propuesto por Medbø, Beneke et al. (2002) diseñaron un método para



estimar CAn, considerando los hallazgos previamente mencionados. En dicho estudio se propone sumar la contribución de ambos ya que se expresaban en consumo de oxígeno. De esta forma el nuevo método parte el cálculo de la integral conformada por la primera exponencial del modelo ajustado en EPOC_{rápido} (considerado como E_{PCr}); sumando al resultado de la conversión de las $[LA^{-1}]$ empleando el equivalente de $1 \text{ mmol}^{-1} = 3 \text{ mL } O_2/\text{kg}^{-1}$. (considerado como $E_{[La]}$) (Fig. 2). Fue hasta el año 2010 cuando Bertuzzi et al. (2010) compararon el método de Medbø con el empleado por Beneke y de acuerdo con los resultados no se encontraron diferencias significativas ($p = 0.60$) y se observó una alta correlación ($r = 0.78$, $p = 0.01$) entre ambos métodos. Por lo tanto, este nuevo método denominado en su tiempo MAOD alternativo (MADO_{alt}) y posteriormente EPOC_{rápido}+ $[LA^{-1}]$, se consideró como válido para estimar la CAn. EPOC_{rápido}+ $[LA^{-1}]$ presenta ventajas frente MAOD ya que implica sólo dos visitas al laboratorio: una para determinar la intensidad supra máxima con una prueba incremental y la otra para valorar la CAn en un esfuerzo supra máximo, permitiendo, además estimar la contribución de las dos vías energéticas que la conforman (E_{PCr} y $E_{[La]}$).



Figura 1: Representación gráfica del máximo déficit acumulado de oxígeno; estimado a partir de la diferencia entre la demanda de O_2 establecida en la regresión lineal y el VO_2 acumulado en un esfuerzo supra máximo (adaptado de Medbø et al., (1988) y Bertuzzi et al., (2009).

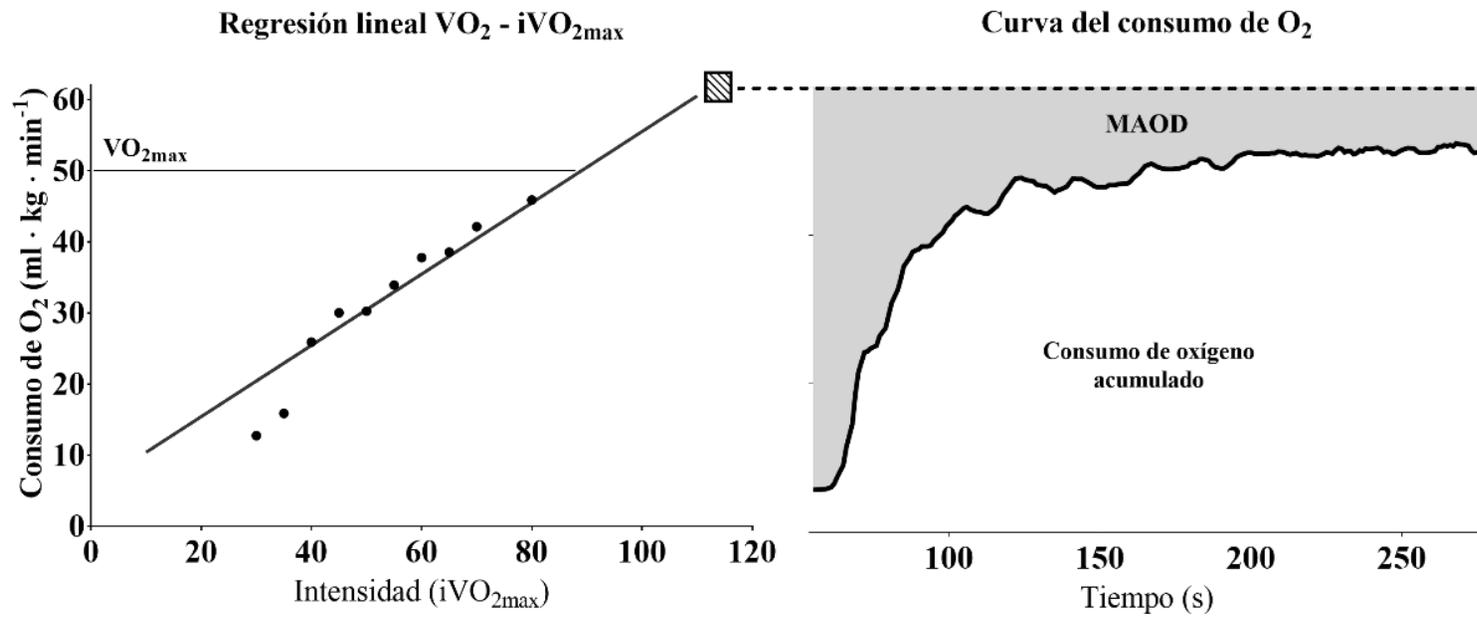
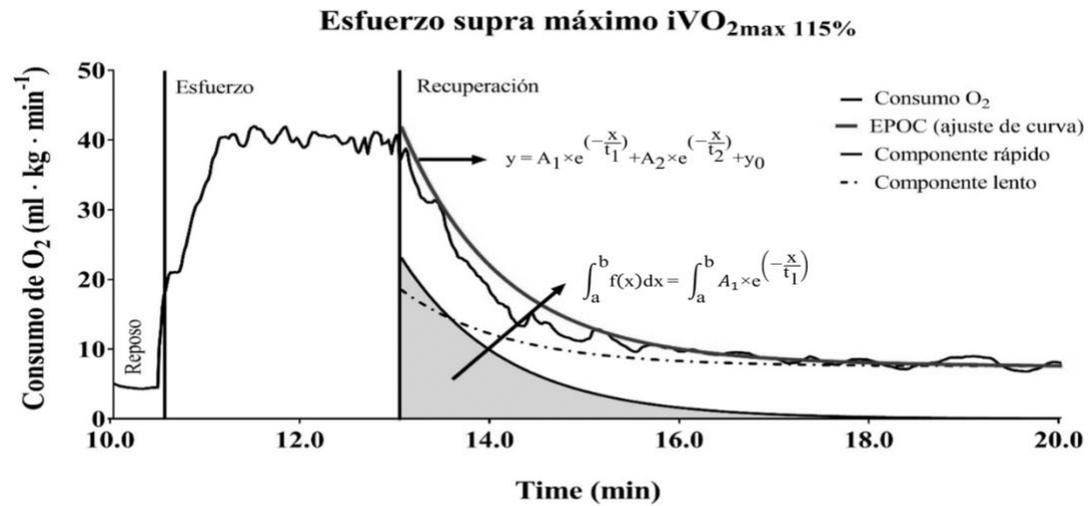




Figura 2: Ajuste biexponencial a los datos de EPOC y área que representa la E_{PCR}





A pesar de lo antes expuesto, EPOCrápido+[LA-] no deja de ser controvertido como método válido ya que los fundamentos fisiológicos expuestos en la literatura científica principalmente cuando hablamos del significado de EPOC en la fisiología del ejercicio no son conclusivos (Bangsbo et al., 1990). Adicionalmente, los cálculos matemáticos necesarios para estimarla son complejos, requieren de una detallada metodología, de un entendimiento profundo del proceso matemático y del funcionamiento de los softwares disponibles para su cálculo. Por tal motivo, es oportuno contar con una revisión actualizada sobre este tema ya que determinar la bioenergética en ejercicios intensos es imprescindible para la prescripción del entrenamiento deportivo, así como para el control y seguimiento de la adaptación del deportista. En consecuencia, el objetivo de la revisión fue exponer los fundamentos fisiológicos que respaldan este nuevo método. Para tal fin, organizamos el documento en los siguientes tópicos: 1) presupuestos fisiológicos del EPOCrápido+[LA-], 2) validez y confiabilidad del método y 3) su repercusión en el proceso de la preparación deportiva.

METODOLOGÍA

Búsqueda de literatura.

La revisión tomo como guía las recomendaciones de PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) para la elaboración de artículos de revisión y metaanálisis. La búsqueda fue hecha independientemente por el autor



en tres bases de datos electrónicas (PubMed, Redalyc y Scopus) a fin de identificar artículos publicados hasta el mes de octubre de 2021. Adicionalmente, fue basada en una búsqueda “booleana” a partir de palabras clave de artículos previamente conocidos. Dicha búsqueda incluyó términos como: capacidad anaerobia (considerada variable dependiente), deuda de oxígeno, sistema aláctico, sistema láctico, ATP-CP, glucólisis (consideradas variables independientes), deportes en equipo, corredores, jugadores de fútbol soccer, fútbol americano, rugby y voleibol (como población estudiada). Las palabras clave fueron escritas en español, inglés y portugués en dependencia de la base de datos empleada. Además, durante la búsqueda se usó el operador lógico “O” (“OR”) a fin de conformar toda la estructura de la búsqueda.

Criterio de inclusión y exclusión.

Los artículos que no emplearon EPOCrápido+[LA-] para la estimación de $\dot{V}O_{2\max}$, así como los que no fueron escritos entre 1980 y octubre de 2021 fueron excluidos. Por el contrario, artículos en español, inglés o portugués que explicaron el fundamento fisiológico de la $\dot{V}O_{2\max}$ empleando métodos invasivos (biopsia muscular y/o fosforo espectroscopia por medio de resonancia magnética ($^{31}\text{P-NMR}$)) así como los artículos que estudiaron la validez, confiabilidad y relevancia en la práctica empleando EPOCrápido+[LA-] fueron incluidos en la revisión.

Desarrollo.

Análisis descriptivo.

La búsqueda inicial identificó 5192 títulos que posteriormente con la ayuda de un procesador de referencias (p.ej. Mendeley) fueron excluidos 4617 por no estar relacionados con el área deportiva, 257 artículos por no estar dentro del rango de fecha establecido y 6 artículos duplicados. Después, con los 312 artículos restantes se llevó a cabo un análisis de relevancia, partiendo de la lectura del título del artículo y de su resumen; removiendo 258 artículos no relevantes. Finalmente, el contenido completo de los 54 artículos restantes fue leído y analizado, dejando fuera 38 artículos que no estuvieron directamente relacionados con la temática. En total 16 artículos fueron contemplados para este estudio (Fig. 3). El análisis cronológico de los artículos seleccionados indicó que fueron publicados a partir del 2002 resaltando que el 50% de los mismos fueron publicados en los dos años previos a esta revisión. Adicionalmente, la tabla 1 resume y cataloga los artículos incluidos de acuerdo con el objetivo planteado en la presente revisión.

El objetivo del 62% de los artículos seleccionados tuvo relación con el impacto práctico del concepto de CAn. Ya sea para determinar la bioenergética de diferentes modalidades deportivas o para establecer el efecto en la CAn bajo la influencia de ergogénicos (p. ej. caféina, taurina y bicarbonato de sodio). Por otro lado, el 31%, se enfocaron en la validez y confiabilidad del método para estimar CAn. Finalmente, tan solo el 6% se enfocó directamente en la fundamentación fisiológica del método.

Fundamentación fisiológica.

Siguiendo la racionalidad que muestra el artículo de Bertuzzi et al. (2009) el método $EPOC_{rápido}+[LA^-]$ se fundamenta en tres suposiciones fisiológicas: 1) el consumo de oxígeno durante $EPOC_{rápido}$ debe ser equivalente cuantitativamente al déficit O_2 , 2) durante $EPOC_{rápido}$ la PCr debe recuperarse hasta alcanzar los niveles previos al esfuerzo (o cercano a ellos) y 3) la concentración de lactato en sangre debe ser expresada en equivalentes de oxígeno a fin de estimar la contribución energética de la $E_{[La]}$, tal y como di Prampero et al.(1981) lo sugirieron.

La primera suposición es la más compleja de corroborar. Hasta ahora la evidencia científica demuestra que en esfuerzos sub máximos la cantidad de O_2 (área rectangular) no es similar en cantidad a lo calculado en $EPOC$ (integral después del ajuste) (Gaesser & Brooks, 1984). Además, no es posible hacer el mismo cálculo en esfuerzos supra máximos ya que el área rectangular rebaza los valores máximos del $\dot{V}O_2$. Razón por la cual se dificulta comprobar la primera suposición del método $EPOC_{rápido}+[LA^-]$. Por lo tanto, tan solo se especula que $EPOC_{rápido}$ representa la energía proveniente de E_{PCr} , consumida durante la fase inicial del ejercicio (Beneke et al., 2002; 2004; Bertuzzi, 2010).

La segunda suposición ha sido corroborada a través del modelaje matemático y estudios experimentales. Dicho modelo demostró que la cinética de la recuperación de la PCr es inversa al $\dot{V}O_2$ respirado durante $EPOC_{rápido}$ y por ello se asume una dependencia entre ambos (Barstow & Molé, 1991; Korzeniewski & Zoladz, 2001;

Korzeniewski & Zoladz, 2013). Por ejemplo, en dos estudios, el estudio de Piiper y Spiler (como se cita en Bertuzzi et al., 2009) corrobora la importancia de EPOC, ya que el O_2 utilizado por el cuerpo humano después de concluido el ejercicio es el factor más influyente en la recuperación de la PCr. Y el estudio de Haseler et al. (1999), estudios con biopsia muscular y ^{31}P -NMR demostró que la recuperación de la PCr es completamente inhibida cuando la circulación es obstruida en los músculos que fueron activados.

Las investigaciones de Margaria et al. (1963) y di Prampero et al. (1981; 1999) contribuyeron a la tercera suposición de este método. A pesar de las complicaciones para medir la contribución de la $E_{[La]}$, los autores propusieron que es posible obtener una estimación de dicha contribución a través de una relación lineal entre la medición de los incrementos de lactato, el $\dot{V}O_2$ y la intensidad conocida en la cual el ejercicio fue realizado. Obteniendo así una pendiente de $\sim 3.3 \text{ ml } O_2 \text{ kg}^{-1} \text{ nM}^{-1}$ significando que, 1 mM de incremento en la concentración de lactato sanguíneo es equivalente a la liberación de energía expresada en consumo de oxígeno de $\sim 3.3 \text{ ml } O_2$ por kilogramo de peso corporal.

Validez y confiabilidad del método.

El primer estudio que busco dar validez al método fue propuesto por Bertuzzi et al. (2010) reportando diferencia ninguna entre MAOD y $EPOC_{\text{rápido}}+[LA^-]$ ($p = 0.60$) y una alta correlación entre ambos métodos de estimación ($r = 0.78$; $p = 0.014$). Posteriormente, Zagatto et al. (2016) y Miyagi et al. (2017) en estudios similares, comprobaron la confiabilidad

y reproductibilidad del método evaluado en corredores y ciclistas recreativos a diferentes intensidades relativas al $i\dot{V}O_{2\text{max}}$ (p. ej. 100%, 110%, 115%, 120%, 130% 140% y 150%). No se observaron diferencias significativas al ser estimada la CAN en las distintas intensidades supra máximas ($p = 0.56$; $F_{(8,112)} = 0.06$; $\eta^2 = 0.12$) ni entre las estimaciones de la CAN con MAOD y $EPOC_{\text{rápido}}+[LA^-]$. Adicionalmente, reportaron correlaciones significativas solo en las intensidades de 100% y 115% de la $i\dot{V}O_{2\text{max}}$.

Otros dos estudios que refuerzan la validez del método encontraron asociaciones entre los componentes E_{PCr} y $E_{[La]}$ que conforman el método $EPOC_{\text{rápido}}+[LA^-]$ y las pruebas de corrida atada y la prueba de Wingate 30 seg. Por ejemplo, Zagatto et al. (2017) observaron asociaciones entre $EPOC_{\text{rápido}}+[LA^-]$, la potencia media ($r = 0.58$; $p = 0.03$), el trabajo total ($r = 0.57$; $p = 0.03$) y la fuerza media ($r = 0.79$; $p = 0.001$). También, $E_{[La]}$ presento una asociación con la potencia media ($r = 0.58$; $p = 0.03$).

Por otro lado, Bertuzzi et al. (2015) concluyeron partiendo de las correlaciones observadas entre E_{PCr} y la potencia pico ($r = 0.71$; $p = 0.03$) y entre $E_{[La]}$ y la potencia media ($r = 0.72$; $p = 0.03$), que tanto $EPOC_{\text{rápido}}+[LA^-]$ como la prueba de Wingate 30s. son métodos ideales para valorar las vías no mitocondriales de producción de energía. Además, que la CAN es importante para mantener la producción de fuerza muscular en esfuerzos supra máximos, es sensible para diferenciar tipos de entrenamiento (Zagatto et al., 2017) y $EPOC_{\text{rápido}}+[LA^-]$ y

es capaz de dividir las dos vías energéticas que conforman CAN a diferencia de MAOD.

Relevancia en la práctica.

El estudio pionero de Beneke et al. (2002) utilizó $EPOC_{rápido}+[LA^-]$ con el objetivo de determinar la magnitud de la contribución de las fuentes de energía no mitocondriales durante la prueba de Wingate 30s. En dicho estudio observaron que la prueba de Wingate 30s. es altamente anaerobia con una contribución energética de ~80% y con un predominio de la vía $E_{[La]}$ de producción de energía. También $EPOC_{rápido}+[LA^-]$ fue útil para valorar la bioenergética en deportes como el karate, la escalada deportiva y la natación (Sousa et al., 2013). Por ejemplo, Beneke et al. (2004) determinaron que la contribución energética en esta especialidad del karate es predominantemente aerobia seguida de la contribución de la energía E_{PCR} empleada en los movimientos explosivos necesarios en una rutina de esta modalidad. De forma similar, Bertuzzi et al. (2007) empleo el método, pero en escaladores deportivos logrando caracterizar este deporte como predominantemente anaerobio e independiente del nivel de dificultad del trayecto a escalar y de los niveles de fuerza del deportista.

Por otro lado, $EPOC_{rápido}+[LA^-]$ permite verificar alteraciones en CAN bajo el uso de ergogénicos, tal y como lo observaron Brisola et al. (2015) al verificar el efecto de la ingesta aguda de bicarbonato de sodio ($NaHCO_3$). Reportando una modificación en el metabolismo no mitocondrial atribuida a una elevada actividad de la $E_{[La]}$ a causa

de un posible efecto compensatorio de la acidosis metabólica provocada por el ejercicio intenso. Otros ergogénicos tales como la cafeína y la taurina no mostraron efecto alguno en la CAN (de Poli et al., 2016; Milioni et al., 2016). No obstante, es importante mencionar que de Poli et al. (2016) observaron un cambio en la magnitud de uno de los parámetros del modelo biexponencial (τ_1) pero no altero la energía proveniente de E_{PCR} .

Finalmente, Bertuzzi et al. (2016) desarrollaron un software de libre acceso denominado GEDAE-LaB, que tiene como finalidad facilitar el cálculo de la contribución energética a partir del $\dot{V}O_2$, $EPOC_{rápido}$ y las concentraciones de lactato sanguíneo. Para validar dicho software los autores midieron el gasto metabólico por gasometría en 11 estudiantes de educación física sometidos a dos esfuerzos físicos en cicloergómetro (moderado 90% del umbral ventilatorio y severo 110% $i\dot{V}O_{2max}$). Posteriormente, compararon los resultados de los cálculos entre un software comercial (p. ej. Origin 6.0, Microcal, Massachusetts, USA) y los scripts del software libre. No encontrando diferencias significativas en las estimaciones de ambos softwares en ninguna de las tres vías energéticas ni en las dos intensidades empleadas.

Figura 3: Diagrama de la metodología empleada en este artículo

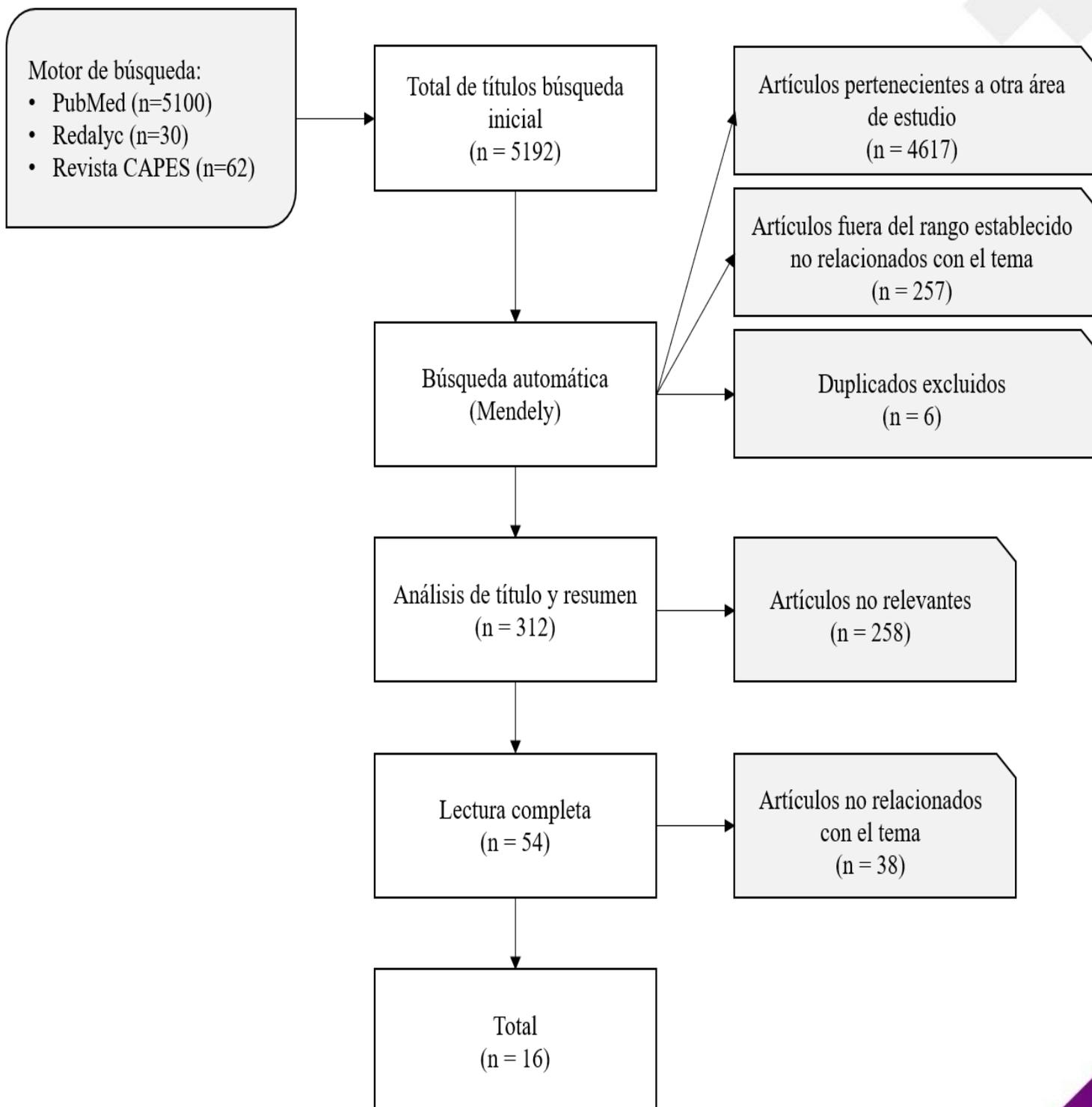


Tabla 1: Resumen de los estudios incluidos en la revisión.

Estudio	Categoría	Objetivo	Grupo
Bertuzzi et al. (2009)*	1	Presentar las bases teóricas y metodológicas de la respuesta on y off del $\dot{V}O_2$.	N/A
Bertuzzi et al. (2010)#	2	Evaluar la habilidad de MAODalt de estimar MAOD (es decir CAn).	Ciclistas no profesionales (n=9)
Zagatto et al. (2016)#	2	Determinar la validez y reproductibilidad de MAODalt en carrera.	Sujetos físicamente activos (n=29)
Miyagi et al. (2017)#	2	Determinar la validez y de MAODalt en cicloergómetro.	Ciclistas no profesionales (n=14)
Zagatto et al. (2017a)#	2	Investigar la sensibilidad de MAODalt para discriminar la CAn en diferentes tipos de entrenamiento.	Sujetos: poco entrenados (n=12), moderadamente entrenados (n=12), entrenados en resistencia (n=11) y jugadores de rugby (n=11).
Zagatto et al. (2017b)#	2	Investigar la relación entre la MAODalt y 30 seg. "all-out" de carrera atada.	Corredores no profesionales (n=14)
Beneke et al. (2002)#	3	Determinar la contribución de las fuentes de energía no mitocondriales en el test de Wingate 30 seg.	Hombres saludables (n=11)
Beneke et al. (2004)#	3	Examinar el perfil energético del karate, en su modalidad kumite.	Karatekas clasificados internacionalmente (n=10)



Bertuzzi et al. (2007)#	3	Investigar la influencia del nivel de entrenamiento, el nivel de dificultad y la contribución energética del tren superior en la escalada deportiva.	Escaladores elite y no profesionales (n=6 y 7 respectivamente).
Sousa et al. (2012)#	3	Estimar la contribución de ECP a través de dos métodos: el componente rápido de EPOC y la cinética de la fosfocreatina durante la contracción muscular.	Nadadores elite especialistas en media distancia (n=10).
Bertuzzi et al. (2015)#	2	Determinar la relación entre los componentes energéticos de MAODalt y el test de Wingate 30 s.	Estudiantes de educación física (n=9)
Brisola et al. (2015)!	3	Investigar el efecto de la suplementación aguda de bicarbonato de sodio en la CAn estimada por medio de MAODalt y su correlación con las pruebas de 200 y 400 metros	Sujetos moderadamente activos (n=15).
Bertuzzi et al. (2016)#	3	Describir la funcionalidad de un software libre denominado GEDAE-LaB desarrollado para calcular la contribución energética en condiciones de ejercicio.	Estudiantes de educación física (n=11)
Malta et al. (2016)!	3	Investigar el efecto agudo de la terapia de fotobiomodulación en MAODalt y el rendimiento en un esfuerzo de alta intensidad.	Sujetos saludables (n=15)





Milioni et al. (2016)&	3	Investigar el efecto de la suplementación aguda de taurina en el rendimiento de un esfuerzo de alta intensidad y la CAn estimada por medio de MAODalt	Sujetos saludables (n=17).
de Poli et al. (2016)!	3	Investigar el efecto de la suplementación aguda cafeína en la CAn estimada por medio de MAODalt	Corredores no profesionales (n=18).

1: Presupuesto fisiológicos 2: validez y/o confiabilidad del método 3: repercusión en la práctica. N/A: no aplica, * Estudio de revisión, # Estudio experimental, & Estudio aleatorio cruzado controlado, ! Estudio doble ciego cruzado controlado.



CONCLUSIÓN

Consideraciones generales.

El objetivo de la presente revisión fue exponer los fundamentos que sustentan este nuevo método denominado EPOC_{rápido}+ $[LA^-]$ para la estimación de la CAN. De acuerdo con nuestra revisión EPOC_{rápido}+ $[LA^-]$ es un método: 1) sensible en detectar los efectos de algunos ergogénicos y también niveles de entrenamiento, 2) eficiente porque requiere menos visitas al laboratorio y 3) con el añadido de estimar por separado las dos vías energéticas que integran la CAN. Sin embargo, debido a la poca investigación que respalda fisiológicamente su uso, así como la falta de metodologías claras sobre el ajuste matemático consideramos que EPOC_{rápido}+ $[LA^-]$ puede ser utilizado para determinar la bioenergética de las vías no mitocondriales de producción de energía, pero los resultados deben ser analizados con cautela y emplearse una metodología clara y estricta a la hora de ajustar la ecuación biexponencial a los datos medidos de EPOC. A fin de estimar con mayor precisión la CAN a través de EPOC_{rápido}+ $[LA^-]$ recomendamos la siguiente metodología: a) Usar un analizador de gases confiable (p. ej. K4b² Cosmed o CPET Cosmed, Italy), b) valorarla en un esfuerzo supra máximo a 115% $i\dot{V}O_{2max}$, c) el voluntario deberá realizar el esfuerzo hasta el agotamiento e inmediatamente después debe adoptar una posición de reposo con pocos músculos activos (p. ej. en el sillín del cicloergómetro o trasladarse lentamente a una silla cercana), d) continuar la medición de los gases

durante por lo menos 10 minutos para medir EPOC, e) durante EPOC extraer las muestras de lactato en sangre capilar en los minutos: 3, 5 y 7. El ajuste matemático debe ser configurado de la siguiente forma: los valores iniciales (starting values), $A_1 = \dot{V}O_{2pico}$, $A_2 = \frac{1}{2} A_1$, $\tau_1 = 0.5$, $\tau_2 = 1.5$ y $y_0 = \dot{V}O_{2basal}$. Al final verificar el resultado del ajuste el cual debe respetar los siguiente: $A_1 > A_2 \geq y_0$ y $\tau_1 < \tau_2$.

Perspectivas y futuros trabajos.

Nuestra perspectiva propone en primer plano más estudios que comparen la estimación de CAN a través de EPOC_{rápido}+ $[LA^-]$ contra datos medidos en tejido muscular o con ³¹P-NMR con el objetivo de reforzar la validez del método. Por otra parte, futuros trabajos se pueden centrar en establecer criterios para el ajuste matemático en los datos de EPOC_{rápido} ya que los estudios previamente descritos difieren en promedio ~30% en la estimación de la contribución de E_{pCr} . Consideramos que dicha diferencia se debe a la configuración de los algoritmos que ajustan el modelo biexponencial a los datos de EPOC_{rápido}. Finalmente, otro campo de estudio que se ha abierto gracias a la practicidad del método EPOC_{rápido}+ $[LA^-]$ es verificar mejorías en la CAN bajo la influencia de diversos protocolos de entrenamiento (p.ej. entrenamiento de alta intensidad o entrenamientos de musculación).

REFERENCIAS

Krogh, A., & Lindhard, J. (1920). The changes in respiration at the transition from work to rest. *Journal of physiology*, 53(6), 431-439.

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1405614/>

Hale, T. (15 de 2 de 2008). History of developments in sport and exercise physiology: A. V. Hill, maximal oxygen uptake, and oxygen debt. *Journal of Sports Sciences*, 26(4), 365-400. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02640410701701016>.

Wasserman, K., Hansen, J. E., Sietsema, K. E., Sue, D. Y., Stringer, W. W., Sun, X. G., & Whipp, B. J. (2011). *Principles of Exercise Testing and Interpretation: Including Pathophysiology and Clinical Applications* (Fifth ed.). Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins.

Margaria, R., Edwards, H., & Dill, D. (1933). The Possible Mechanisms of Contracting and Paying the Oxygen Debt and the Role of Lactic Acid in Muscular Contraction. *American Journal of Physiology*. <https://journals.physiology.org/doi/abs/10.1152/ajplegacy.1933.106.3.689>

di Prampero, P., Peeters, L., & Margaria, R. (5 de 1973). Alactic O₂ debt and lactic acid production after exhausting exercise in man. *Journal of applied physiology*, 34(5), 628-32. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/4703737/>

Scott, C. (2005). Contribution of anaerobic energy expenditure to whole body thermogenesis. *Nutrition & metabolism*, 2(1), 14. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1182393/pdf/1743-7075-2-14.pdf>

Gastin, P. (1994). Quantification of anaerobic capacity. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 4, 91-112.

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1600-0838.1994.tb00411.x>

Green, S. (1994). A definition and systems view of anaerobic capacity. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, 69(2), 168-73. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/7805673/>

Medbø, J., Mohn, a., Tabata, I., Bahr, R., Vaage, O., & Sejersted, O. (1988). Anaerobic capacity determined by maximal accumulated O₂ deficit. *Journal of applied physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 64(1), 50-60. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/3356666/>

Noordhof, D., de Koning, J., & Foster, C. (2010). The maximal accumulated oxygen deficit method: a valid and reliable measure of anaerobic capacity? *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 40(4), 285-302. <https://link.springer.com/article/10.2165/11530390-000000000-00000>

Whipp B J, & Özyner F. (1998). The kinetics of exertional oxygen uptake: assumptions and inferences. *Medicina dello Sport*, 2(51), 139-149. <https://www.minervamedica.it/en/journals/medicina-dello-sport/article.php?cod=R26Y1998N02A0139>

Korzeniewski, B., & Zoladz, J. (1 de 9 de 2013). Slow VO₂ off-kinetics in skeletal muscle is associated with fast PCr off-kinetics--and inversely. *Journal of applied physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 115(5), 605-12. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23788573/>

Katch, V. (2 de 3 de 1973). Kinetics of oxygen uptake and recovery for supramaximal work of short duration. *Internationale Zeitschrift fur angewandte Physiologie, einschliesslich Arbeitsphysiologie*, 31(3), 197-207.

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/4696828/>

Roberts, A., & Morton, A. (1978). Total and Alactic Oxygen Debts after Supramaximal Work. *Europ. J. appl. Physiol*, 38, 281-289.

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/668682/>

Rossiter, H., Ward, S., Kowalchuk, J., Howe, F., Griffiths, J., & Whipp, B. (2002). Dynamic asymmetry of phosphocreatine concentration and O₂uptake between the on- and off-transients of moderate- and high-intensity exercise in humans. *Journal of Physiology*, 541(3), 991-1002. <https://physoc.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1113/jphysiol.2001.012910?sid=nlm%3Apubmed>

Rossiter, H. (2011). Exercise: Kinetic considerations for gas exchange. *Comprehensive Physiology*, 1(1), 203-244.

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23737170/>

di Prampero, P., Meyer M, P, C., & Piiper J. (1978). Energetics of anaerobic glycolysis in dog gastrocnemius. *European journal of physiology*(377), 1-8. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/569275/>

di Prampero, P. (1981). Energetics of muscular exercise. *Reviews of physiology, biochemistry and pharmacology*, 89, 143-222.

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/7015457/>

Beneke, R., Pollman, C., Bleif, I., & Leit, R. (2002). How anaerobic is the Wingate Anaerobic Test for humans? *European Journal of Applied Physiology*, 87(4-5), 388-392.

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12172878/>

Bertuzzi, R., Franchini, E., Ugrinowitsch, C., Kokubun, E., Lima-Silva, A., Pires, F., . . . Kiss, M. (2010). Predicting MAOD using only a Supramaximal exhaustive test. *International Journal of Sports Medicine*, 31(07), 477-481.

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20432195/>

Bangsbo, J., Gollnick, P. D., Graham, T. E., Juel, C., Kiens, B., Mizuno, M., & Saltin, B. (1990). Anaerobic energy production and O₂ deficit-debt relationship during exhaustive exercise in humans. *The Journal of physiology*, 422, 539-559. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/2352192>

Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D., & PRISMA Group. (21 de 7 de 2009). Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement. *PLoS Medicine*, 6(7), e1000097.

Gaesser, G., & Brooks, G. (1984). Metabolic bases of excess post-exercise oxygen consumption: a review. *Medicine and science in sports and exercise*, 16(1), 29-43. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/6369064/>

Beneke, R., Beyer, T., Jachner, C., Erasmus, J., & Hutler, M. (20 de 8 de 2004). Energetics of karate kumite.

European Journal of Applied Physiology, 92(4-5), 518-23.
<https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00421-004-1073-x>

Barstow, T., & Molé, P. (1991). Linear and nonlinear characteristics of oxygen uptake kinetics during heavy exercise. *Journal of applied physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 71(6), 2099-2106.
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/1778898/>

Korzeniewski, B., & Zoladz, J. (2001). A model of oxidative phosphorylation in mammalian skeletal muscle. *Biophysical chemistry*, 92(1-2), 17-34.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301462201001843?via%3Dihub>

Bertuzzi, R., & Souza, E. (2009). Resposta cinética do consumo de oxigênio: relação entre metabolismo aeróbio e Atp-Cp. *Arquivos em Movimento*, 5(1), 99-118.
<https://revistas.ufrj.br/index.php/am/article/view/9137>

Haseler, L. J., Hogan, M. C., & Richardson, R. S. (1999). Skeletal muscle phosphocreatine recovery in exercise-trained humans is dependent on O₂ availability. *Journal of Applied Physiology*, 86(6), 2013-2018.
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/10368368/>

Margaria, R., Cerretelli, P., di Prampero, P., Massari, C., & Torelli, G. (3 de 1963). Kinetics and mechanism of oxygen debt contraction in man. *Journal of applied physiology*, 18, 371-7.
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/13932994/>

di Prampero, P., & Ferretti, G. (1999). The energetics of anaerobic muscle metabolism: A reappraisal of older and recent concepts. *Respiration Physiology*, 118(2-3), 103-115.
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/10647856/>

Zagatto, A., Bertuzzi, R., Miyagi, W., Padulo, J., & Papoti, M. (2016). MAOD determined in a single Supramaximal test: A study on the reliability and effects of Supramaximal intensities. *International Journal of Sports Medicine*.
<https://www.thieme-connect.com/products/ejournals/abstract/10.1055/s-0036-1582330>

Miyagi, W., de Poli, R., Papoti, M., Bertuzzi, R., & Zagatto, A. (13 de 2 de 2017). Anaerobic Capacity estimated in A Single Supramaximal Test in Cycling: Validity and Reliability Analysis. *Scientific Reports*, 7, 42485.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5304204/pdf/srep42485.pdf>

Zagatto, A., Miyagi, W., Sousa, F., & Gobatto, C. (9 de 2 de 2017). Relationship between anaerobic capacity estimated using a single effort and 30-s tethered running outcomes. (J. Padulo, Ed.) *PLOS ONE*, 12(2), e0172032.
<https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0172032>

Bertuzzi, R., Kiss, M., Damasceno, M., Oliveira, R., & Lima-Silva, A. (2015). Association between anaerobic components of the maximal accumulated oxygen deficit and 30-second Wingate test. *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*, 48(3), 261-266.
<https://www.scielo.br/j/bjmbr/a/CyWnXLf88KmPDyCRQDwHfFK/?lang=en>

Zagatto, A., Nakamura, F., Milioni, F., Miyagi, W., de Poli, R., Padulo, J., . . . Papoti, M. (2017). The sensitivity of the alternative maximal accumulated oxygen deficit method to discriminate training status. *Journal of Sports Sciences*, 414(1), 1-8. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02640414.2016.1273539?journalCode=rjsp20>

Bertuzzi, R., Franchini, E., Kokubun, E., & Kiss, M. (5 de 10 de 2007). Energy system contributions in indoor rock climbing. *European journal of applied physiology*, 101(3), 293-300. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17602238/>

Sousa, A., Figueiredo, P., Zamparo, P., Vilas-Boas, J., & Fernandes, R. (2013). Anaerobic alactic energy assessment in middle distance swimming. *European Journal of Applied Physiology*, 113(8), 2153-2158. <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00421-013-2646-3>

Brisola, G., Miyagi, W., da Silva, H., & Zagatto, A. (2015). Sodium bicarbonate supplementation improved MAOD but is not correlated with 200- and 400-m running performances: A double-blind, crossover, and placebo-controlled study. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 40(9), 931-937. https://cdnsiencepub.com/doi/10.1139/apnm-2015-0036?url_ver=Z39.88-2003&rfr_id=ori:rid:crossref.org&rfr_dat=cr_pub%20%20pubmed

de Poli, R., Miyagi, W., Nakamura, F., & Zagatto, A. (24 de 8 de 2016). Caffeine Improved Time to Exhaustion, But Did Not Change Alternative Maximal Accumulated Oxygen Deficit Estimated

During a Single Supramaximal Running Bout. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*, 1-21. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27096623/>

Milioni, F., Malta, E., Rocha, L., Mesquita, C., de Freitas, E., & Zagatto, A. (2016). Acute administration of high doses of taurine does not substantially improve high-intensity running performance and the effect on maximal accumulated oxygen deficit is unclear. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 41(5), 498-503. <https://cdnsiencepub.com/doi/10.1139/apnm-2015-0435>

Bertuzzi, R., Melegati, J., Bueno, S., Chiarone, T., Pasqua, L., Gáspari, A., . . . Goldman, A. (4 de 1 de 2016). GEDAE-LaB: A Free Software to Calculate the Energy System Contributions during Exercise. (J. Peterson, Ed.) *PloS one*, 11(1), e0145733. <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0145733>

Bangsbo, J. (1996). Oxygen deficit: a measure of the anaerobic energy production during intense exercise? *Canadian journal of applied physiology = Revue canadienne de physiologie appliquee*, 21(5), 350-363. Recuperado el 5 de Octubre de 2019, de <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8905187>

Harris, P. (1969). Lactic Acid and the Phlogiston Debt. *Curdiousc. Res*, 3, 381-390.

Harris, R., Edwards, R., Hultman, E., Nordesjö, L., Ny Lind, B., & Sahlin, K. (28 de 12 de 1976). The time course of phosphorylcreatine resynthesis during recovery of the quadriceps muscle in

man. *Pflugers Archiv : European journal of physiology*, 367(2), 137-42.

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/1034909>



Copyright (c) 2022 Revista Mexicana de Ciencias de la Cultura Física. Este documento se publica con la política de Acceso Abierto. Distribuido bajo los términos y condiciones de Creative Commons 4.0 Internacional <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>.