

Conceptos de capacidad y potencia anaeróbica actualización de la terminología. Revisión sistemática

Concepts of anaerobic capacity and power: systematic review of terminology update

Mauricio Ernesto Tauda, Eduardo Cruzat Bravo, Harry Castro Núñez, David Ergas Schleeff.

Universidad Santo Tomás (Chile)

Resumen. Introducción: La capacidad y potencia anaeróbica son conceptos clave en la fisiología del ejercicio, especialmente en deportes que requieren esfuerzos explosivos y de alta intensidad. A lo largo de las décadas, la terminología utilizada para describir estos conceptos ha evolucionado conforme avanza el conocimiento científico y las tecnologías de medición, lo que ha permitido una comprensión más precisa de los mecanismos fisiológicos subyacentes y su aplicación en el deporte. Objetivo: Esta revisión sistemática tiene como propósito actualizar la terminología en los conceptos de capacidad y potencia anaeróbica. Métodos: Se realizó una búsqueda exhaustiva en bases de datos científicas utilizando términos relacionados con capacidad y potencia anaeróbica, así como términos asociados. Se incluyen estudios que ofrecen definiciones actualizadas, estudios comparativos y revisiones de críticas sobre el tema. Para la selección de los estudios relevantes y de calidad, se aplican criterios de inclusión y exclusión específicos. Resultados: Se analizaron 15 estudios que examinaron la evolución de la terminología relacionada con la capacidad y potencia anaeróbica. Los resultados muestran una tendencia hacia definiciones más precisas y específicas de estos conceptos, reflejando los avances en la comprensión de los mecanismos fisiológicos subyacentes. Conclusión: Se destacan nuevos términos y enfoques metodológicos surgidos en la literatura reciente, los cuales proporcionan una base sólida para futuras investigaciones y aplicaciones en la práctica deportiva.

Palabras clave: Actividad física anaeróbica, rendimiento atlético, análisis bioenergético, deportes.

Abstract. Introduction: Anaerobic capacity and power are key concepts in exercise physiology, especially in sports that require explosive and high-intensity efforts. Over the decades, the terminology used to describe these concepts has evolved as scientific knowledge and measurement technologies advance, allowing for a more precise understanding of the underlying physiological mechanisms and their application in sport. Objective: This systematic review aims to update the terminology in the concepts of anaerobic capacity and power. Methods: An exhaustive search was carried out in scientific databases using terms related to anaerobic capacity and power, as well as associated terms. Included are studies that offer updated definitions, comparative studies and critical reviews on the topic. For the selection of relevant and quality studies, specific inclusion and exclusion criteria are applied. Results: 15 studies were analyzed that examined the evolution of terminology related to anaerobic capacity and power. The results show a trend towards more precise and specific definitions of these concepts, reflecting advances in the understanding of the underlying physiological mechanisms. Conclusion: New terms and methodological approaches that have emerged in recent literature are highlighted, which provide a solid basis for future research and applications in sports practice.

Keywords: Anaerobic physical activity, athletic Performance, Bioenergetic, Analysis, sports.

Fecha recepción: 24-07-24. Fecha de aceptación: 17-10-24

Mauricio Ernesto Tauda

mauro.tauda@gmail.com

Introducción

El ejercicio físico impone un desafío significativo para la homeostasis del organismo (Meyerspeer et al., 2020). Para enfrentar este desafío, el cuerpo experimenta adaptaciones celulares y sistémicas que contrarrestan los cambios en el equilibrio homeostático derivados del aumento del recambio energético muscular y la demanda de oxígeno (Tokarska et al., 2023; Glancy et al., 2021; Hawley et al., 2014). Estas adaptaciones están estrechamente vinculadas al metabolismo energético, un conjunto de reacciones químicas que las células realizan para producir o degradar sustancias y generar energía (Abdollahi et al., 2024). Los principales sustratos energéticos son los carbohidratos, las grasas y, en menor medida, las proteínas, que liberan energía almacenada en sus enlaces químicos para la producción de ATP, la molécula clave que suministra energía para diversos procesos celulares (Bakermans et al., 2020; Brooks, 2001). En el músculo esquelético, el ATP generado es utilizado por las proteínas contráctiles sarcoméricas para la contracción muscular, la producción de movimiento y calor (Mohr et al., 2020). La regulación del ATP ocurre a través de tres vías principales: la resíntesis a partir de la fosfocreatina (PCr), la glucólisis anaeróbica y la fosforilación oxidativa

(Niess et al., 2020). Estas vías permiten una adaptación eficiente a las fluctuantes demandas energéticas durante la actividad física. Los primeros dos sistemas metabólicos, anaeróbicos y ubicados en el citosol celular no requieren oxígeno para la resíntesis de ATP. En contraste, la fosforilación oxidativa, o ciclo del ácido tricarboxílico, requiere oxígeno como aceptor final de electrones y depende de parámetros como la reducción intramitocondrial ($[NADH]/[NAD^+]$), el estado energético citoplasmático ($[ATP]/[ADP][Pi]$) y la presión de oxígeno intracelular (Bendahan et al., 2017). El lactato, producto de la glucólisis anaeróbica, juega un papel crucial en la conexión entre el metabolismo glucolítico y el aeróbico. A diferencia de lo que se pensaba anteriormente, el lactato no se oxida directamente en la matriz mitocondrial; más bien, el equilibrio entre los productos de la glucólisis y la lactato deshidrogenasa (LDH) facilita el suministro de productos glucolíticos a la matriz mitocondrial para la fosforilación oxidativa (Layec et al., 2013). El conocimiento actual del metabolismo energético se basa en los avances históricos que identificaron los combustibles que sustentan la producción de energía mecánica. Los trabajos de Justus von Liebig y Michel Eugène Chevreul en el siglo XIX sentaron las bases para la comprensión de las vías bioquímicas del metabolismo intermedio, incluyendo la glucólisis (Meyerhof, 1921,

1924), el ciclo de Krebs (Krebs y Kornberg, 1957), la beta-oxidación de los ácidos grasos (Beinert, 1963) y la fosforilación oxidativa (Mitchell, 1979). Los premios Nobel de Fisiología o Medicina otorgados a Meyerhof, Krebs y Mitchell reflejan la importancia de sus descubrimientos.

En el contexto del ejercicio físico, Meyerhof y otros investigadores pioneros observaron la disminución exponencial en el consumo de oxígeno tras el ejercicio y definieron conceptos clave como la "deuda de oxígeno". Posteriormente, Margaria, Edwards y Dill interpretaron la curva bifásica del consumo de oxígeno durante la recuperación, diferenciando entre las fases "alactácida" y "láctica" de la deuda de oxígeno. Estos hallazgos dieron lugar a una mayor comprensión de la energética del ejercicio y a la diferenciación entre metabolismo anaeróbico láctico y aláctico (Margarita, 1968). Estos conceptos han evolucionado para reflejar la interacción compleja de las vías metabólicas durante el ejercicio, las cuales están estrechamente vinculadas y dependen de la intensidad del esfuerzo (Bangsbo, 1998; Scott, 1997, 2014). Es relevante considerar la información actual sobre la energía que sustenta el metabolismo al inicio de cualquier actividad física, independientemente de su intensidad. Esta energía inmediata puede provenir tanto de la glucólisis como de la fosfocreatina (PCr). Esta teoría se respalda en los estudios de Gudbjarnason et al. (1970), quienes identificaron cuatro isoformas distintas de creatina quinasa (CK) con localizaciones subcelulares específicas: las isoformas citosólicas creatinkinasa (CK-M) y CK-B (originarias del músculo y el cerebro, respectivamente) y dos isoformas mitocondriales (CKmit sarcomérica, en los músculos, y CKmit ubicua, en otros tejidos). Las isoformas citosólicas forman dímeros, como CK-BB, CK-MB y CK-MM, siendo esta última predominante en el músculo esquelético (Jacobs et al., 1962). Estos hallazgos demostraron que la PCr estimula la respiración mitocondrial y revelaron que los compartimentos mitocondrial y citoplasmático están interconectados por un sistema organizado de transferencia de energía constituido por diferentes isoformas de creatina quinasa (CK). Esto sentó las bases para la teoría de la "lanzadera" de PCr, propuesta formalmente por Bessman (1972). En este sistema de "lanzadera" de PCr, el fosfato de alta energía se transfiere desde el ATP generado mediante fosforilación oxidativa en la mitocondria hacia la creatina (Cr) mediante la acción de la CK mitocondrial (CKmit), produciendo PCr y ADP. La PCr se difunde hacia el citoplasma, donde, bajo la acción de las isoformas citosólicas de CK, se genera ATP y Cr. El ATP generado es utilizado por las ATPasas, mientras que la Cr regresa a la mitocondria. La Cr atraviesa más fácilmente la membrana mitocondrial que los nucleótidos de adenina y está presente en mayores niveles intracelulares. Mediante este sistema de "lanzadera", la PCr también participa en la transferencia de fosfato de alta energía desde la mitocondria al citosol (Wallimann et al., 1992; Bessman y Geiger, 1981; Sweeney, 1994). Las principales reacciones químicas que utilizan ATP en el músculo esquelético y cardíaco están asociadas al acoplamiento excitación-contracción: la miosina ATPasa en las microfibrillas

y la Ca²⁺-ATPasa en el retículo sarcoplásmico (SR). Además, una parte significativa del ATP se hidroliza por la Na⁺/K⁺-ATPasa en el sarcolema. Se ha demostrado que la CK se localiza en estos sitios, acoplada funcionalmente a las ATPasas (Balaban, 1990; Saks et al., 1994; Papadopoulos et al., 2000). Aunque esta teoría es aceptada por Greenhaff et al. (2001), ha sido cuestionada en el ámbito del entrenamiento físico.

Al inicio de la contracción, ya sea en condiciones estables o inestables, la PCr mantiene la homeostasis del ATP en sitios de alto recambio energético (Benz et al., 1990; Dunst et al., 2023). Durante el ejercicio, la tasa de resíntesis de ATP está determinada por la fosforilación de ADP mediante la desfosforilación enzimática de PCr, en combinación con la producción de ATP a través de vías glucolíticas y mitocondriales (Mader, 2003). Esta evidencia desafía el dogma tradicional del metabolismo anaeróbico láctico y aláctico, sugiriendo una nueva perspectiva sobre la elección de sustratos en el ejercicio físico. La potencia energética en intensidades submáximas depende principalmente de la glucógeno fosforilasa y, en menor medida, de la fosfofructoquinasa. Parolin et al., (2000) y Parolin et al., (2006) observaron que durante los primeros 6 sg. de un esfuerzo máximo, la glucógeno fosforilasa alcanza su máxima actividad, mientras que la glucólisis contribuye en gran medida a la resíntesis de ATP, con una tasa de 6.2 mmol kg peso seco, comparado con 7.0 mmol kg peso seco para la PCr. La fosforilación oxidativa contribuye con solo 1.3 mmol kg peso seco. La glucólisis representa casi el 47% de la resíntesis de ATP en estos primeros 6 segundos. Tortu et al. (2024) investigaron la contribución de los sistemas energéticos durante dos pruebas: una prueba anaeróbica de Wingate de 30 segundos (SMT) y una prueba compuesta por tres intentos máximos de 10 segundos separados por 30 segundos de recuperación pasiva (IST). En ambos protocolos, se observó una mayor contribución del sistema ATP-PCr, siendo esta mayor en el grupo IST en comparación con SMT, mientras que los sistemas glucolítico y oxidativo mostraron una mayor contribución en SMT. Esta diferencia podría deberse a una mayor resíntesis de PCr y eliminación de lactato durante la prueba IST. La demanda total de energía metabólica en IST fue de 8.2 ± 1.0 L de O₂ para hombres y 6.3 ± 0.7 L de O₂ para mujeres, mientras que en SMT fue de 6.1 ± 0.7 L de O₂ para hombres y 4.8 ± 0.8 L de O₂ para mujeres. No se observaron diferencias de género en el porcentaje de contribución de los sistemas energéticos. Estos resultados, junto con estudios anteriores (Billaut et al., 2003; Soydan et al., 2018; Bogdanis et al., 1998; Toti et al., 2013; Ulupinar et al., 2021; Dawson et al., 1997; Franchini et al., 2016; Panissa et al., 2018; Gastin, 2001; Milioni et al., 2017; Ulupinar y Özbay, 2022; Bogdanis et al., 1996), cuestionan la tradicional división del metabolismo en láctico y aláctico, sugiriendo que esta separación es artificial. Incluso en intensidades máximas de corta duración, la glucólisis contribuye significativamente. Los modelos anteriores, que se basaron en lactato en sangre y deuda de oxígeno, no consideraron que el lactato se acumula dentro del músculo

durante los primeros segundos del ejercicio. Jones et al., (1985), Gaitanos et al., (1993), y Soriot (1995) observaron que, en los primeros 10 segundos de un esfuerzo máximo, la glucólisis representó el 70% de la producción de ATP, mientras que la PCr aportó el resto. Chamari et al., (2001) y Parolin et al., (2000) también encontraron que la glucólisis contribuyó con un 44% del ATP utilizado durante los primeros 6 segundos, mientras que la PCr aportó el 50%. Estos hallazgos cuestionan los conceptos tradicionales de capacidad y potencia anaeróbica, destacando la complejidad del metabolismo en los primeros instantes del ejercicio. Por lo tanto, el objetivo de esta revisión es actualizar la terminología empleada en los conceptos de capacidad y potencia anaeróbica.

Estrategia de búsqueda

La estrategia de búsqueda para esta revisión sistemática siguió el método PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) (Page et al., 2021). Se realizó una búsqueda exhaustiva en bases de datos como PubMed, Embase, Web of Science, Cochrane Library, Scopus y Google Scholar para identificar estudios relevantes. Se utilizaron términos de búsqueda específicos relacionados con bioenergética, sistemas energéticos, capacidad aeróbica y potencia anaeróbica, incluyendo ATP-PCr, fosfocreatina, glucólisis, aeróbico y anaeróbico. Se incluyeron estudios publicados entre 1970 y 2024 que investigaron en humanos a través de pruebas como la Biopsia muscular o Resonancia magnética nuclear en deportistas y pruebas máximas de corta duración, tanto de fuerza como de resistencia.

Criterios de Búsqueda por Base de Datos

Bases de datos utilizadas: PubMed, Embase, Web of Science, Cochrane Library, Scopus, Google Scholar. Términos de búsqueda: Bioenergética, sistemas energéticos, capacidad aeróbica, potencia anaeróbica, capacidad anaeróbica, ATP-PCr, fosfocreatina, glucólisis, aeróbico, anaeróbico. Rango de fechas: Estudios publicados entre 1970 y 2024. Población estudiada: Humanos, deportistas y no deportistas. Tipos de pruebas: Inclusión de estudios que utilizaron biopsia muscular o resonancia magnética nuclear, y pruebas máximas de corta duración tanto de fuerza como de resistencia.

Termino 1 ("bioenergetics" OR "energy systems" OR "aerobic capacity" OR "anaerobic capacity" OR "aerobic performance" OR "anaerobic performance" OR "muscle metabolism" OR "metabolic pathways" OR "ATP production" OR "phosphocreatine" OR "glycolytic metabolism" OR "oxidative metabolism" OR "anaerobic power" OR "muscle biopsy in athletes" OR "nuclear magnetic resonance in athletes")

Termino 2: ("muscle biopsy" OR "nuclear magnetic resonance" OR "MRI" OR "NMR spectroscopy" OR "metabolic assessment" OR "muscle function" OR "exercise physiology" OR "energy expenditure" OR "metabolic rate" OR "muscle oxygenation" OR "muscle biopsy in athletes" OR "nuclear magnetic resonance in athletes")

Termino 3: ("exercise performance" OR "aerobic capacity" OR "anaerobic power" OR "sprint performance" OR "endurance capacity" OR "muscle power" OR "strength training" OR "high-intensity exercise" OR "physical fitness" OR "performance metrics" OR "short-duration maximal tests" OR "strength tests" OR "endurance tests")

Criterios de inclusión

Tipo de Estudio: Estudios originales publicados en revistas científicas revisadas por pares. Ensayos clínicos controlados, estudios observacionales, estudios longitudinales, estudios transversales. Población de Estudio: Participantes humanos, específicamente deportistas. Todos los niveles de habilidad y géneros. Intervenciones y Pruebas: Estudios que investiguen bioenergética y sistemas energéticos, incluyendo, pero no limitado a: ATP-PCr, fosfocreatina, glucólisis, metabolismo aeróbico y anaeróbico. Pruebas máximas de corta duración, tanto de fuerza como de resistencia. Estudios que utilicen biopsia muscular o resonancia magnética nuclear o estimen de manera indirecta la energía con ecuaciones válidas para evaluar metabolitos o funciones musculares. Fecha de Publicación: Estudios publicados entre 1970 y 2024. Idioma: Estudios escritos en inglés, español u otros idiomas que puedan ser traducidos adecuadamente. Disponibilidad de Datos: Estudios con datos completos y accesibles para el análisis.

Criterios de exclusión

Tipo de Estudio: Estudios que no sean originales (por ejemplo, editoriales, cartas al editor, comentarios, opiniones). Estudios que no estén publicados en revistas científicas revisadas por pares. Población de Estudio: Estudios que no incluyan participantes humanos. Estudios que no investiguen directamente aspectos relacionados con bioenergética y sistemas energéticos. Estudios que no utilicen pruebas máximas de corta duración relevantes para evaluar sistemas energéticos. Estudios que no utilicen biopsia muscular o resonancia magnética nuclear para evaluar metabolitos o funciones musculares. Fecha de Publicación: Estudios publicados 1970 y 2024, idioma: Estudios escritos en idiomas que no puedan ser traducidos adecuadamente para la comprensión y análisis. Disponibilidad de Datos: Estudios con datos incompletos o que no proporcionen suficiente información para el análisis adecuado.

Fuentes de información

Se llevó a cabo una búsqueda exhaustiva en las siguientes bases de datos: PubMed, Embase, Web of Science, Cochrane Library, Scopus, Redalyc y Google Scholar. Se incluyeron estudios publicados entre enero de 1970 y enero de 2024. Los resultados de la búsqueda y la selección final de los estudios se representan en la figura 2 la cual resume la cantidad de artículos encontrados en cada base de datos y el proceso de selección aplicado para asegurar la inclusión de estudios relevantes para la revisión sistemática.

Selección y Evaluación de los Estudios

En esta revisión sistemática, se siguió un proceso riguroso para seleccionar y evaluar estudios pertinentes sobre el metabolismo energético. Se realizó una búsqueda exhaustiva en múltiples bases de datos utilizando términos específicos relacionados con bioenergética, sistemas energéticos, capacidad aeróbica y anaeróbica, y metabolismo energético. Se aplicaron criterios de inclusión que abarcaban ensayos controlados aleatorizados, estudios de cohorte y estudios de caso-control publicados entre 1970 y 2024, sin restricción de idioma. Los estudios seleccionados fueron evaluados meticulosamente para determinar su relevancia y calidad metodológica, asegurando que cumplieran con los objetivos de la revisión. Se extrajeron datos pertinentes sobre el diseño del estudio, las características de los participantes, las intervenciones aplicadas y los resultados obtenidos. Este proceso sistemático garantizó la selección de estudios robustos y la obtención de información precisa sobre el metabolismo energético en el contexto revisado.

Extracción de Datos

En el proceso de extracción de datos de esta revisión sistemática, se recopiló información detallada de los estudios seleccionados. Se extrajeron datos sobre el diseño del estudio, características de los participantes (como edad, sexo y estado de salud específico), intervenciones aplicadas (incluyendo tipo, duración y frecuencia del ejercicio o tratamiento), y los resultados obtenidos (como medidas de metabolismo energético, biomarcadores relevantes y mejoras en capacidad aeróbica o anaeróbica). La extracción se realizó meticulosamente utilizando herramientas como hojas de cálculo en Excel, asegurando la estructuración y organización de los datos para un análisis preciso e interpretación adecuada en el contexto de la revisión sistemática sobre metabolismo energético.

Análisis de datos

Recopilación de datos relevantes: Se extrajeron características de los participantes, detalles del diseño del estudio, intervenciones aplicadas y resultados obtenidos de los estudios seleccionados. Síntesis de datos: Se realizó una síntesis cualitativa y/o cuantitativa de los datos extraídos. Esto incluyó la agrupación de estudios por características comunes como tipos de intervenciones o resultados reportados. Interpretación de resultados: Se interpretaron los hallazgos en el contexto del objetivo principal. Se discutieron las limitaciones de los estudios incluidos y se ofrecieron recomendaciones para la práctica clínica o futuras investigaciones. Presentación de resultados: Los resultados del análisis se presentaron en tablas, gráficos o narrativamente según fuera apropiado, para comunicar de manera efectiva las conclusiones de la revisión.

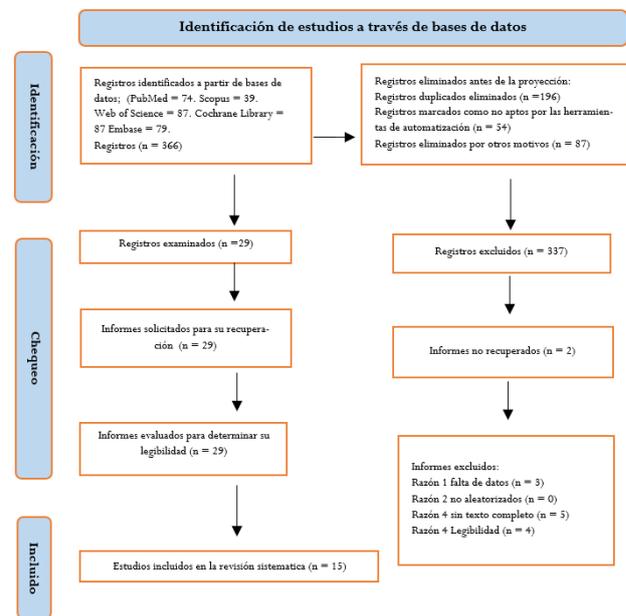


Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA 2020.

Estudio	Generación de secuencia aleatoria (Sesgo de selección)	Ocultación de la asignación (Sesgo de selección)	Enmascaramiento de los participantes y el personal (Sesgo de exclusión)	Enmascaramiento de la evaluación del resultado (Sesgo de detección)	Datos de resultados incompletos (Sesgo de exclusión)	Notificación selectiva (Sesgo de notificación)	Otros sesgos
Bertuzzi et al., 2007	+	-	-	-	+	+	+
Busweller et al., 2012	+	+	-	-	+	+	+
Bartel et al., 2022	+	-	-	-	+	+	+
Bendeck et al., 2002	+	?	-	-	+	+	+
Tortu et al., 2024	+	+	-	?	+	+	+
Broxterman et al., 2017	+	?	-	?	+	+	+
Milioni F et al., 2017	+	?	+	+	+	+	+
Ujupnar et al., 2022	+	?	-	-	?	+	+
Kaufmann et al., 2022	+	?	-	-	+	+	+
Campos et al., 2012	+	-	-	-	+	?	+
Ózbay et al., 2024	+	?	-	-	+	?	+
Lowell D et al., 2013	+	-	-	?	+	+	+
Seemann et al., 2022	+	-	-	+	+	+	+
Zagatto A et al., 2001	+	-	-	-	+	?	+
Figueredo et al., 2011	?	-	-	+	+	+	+

Figura 2. Estudios a selección de riesgo de sesgo (Cochrane ROB).

Esta evaluación muestra que la mayoría de los estudios no cumplen con varios criterios de calidad, especialmente en lo que respecta a la ocultación de la asignación y el enmascaramiento de participantes y personal. Estos sesgos pueden afectar significativamente la validez de los resultados obtenidos en los estudios. Solo unos pocos estudios cumplen con algunos de los criterios de calidad, lo que resalta la necesidad de mejorar el diseño y la metodología en futuras investigaciones.

El análisis de sesgo revela importantes deficiencias en la metodología de los estudios revisados. La falta de generación de secuencia aleatoria, ocultación de la asignación y enmascaramiento tanto de participantes como de la evaluación de resultados sugiere un alto riesgo de sesgo en la mayoría de los estudios. Es fundamental mejorar estos aspectos metodológicos en futuras investigaciones para garantizar la validez y la fiabilidad de los resultados obtenidos.

Tabla 1.
Características generales de los estudios incluidos.

n	Estudio	Edad/peso	Método	Protocolo	Oxidativo (%)	Láctico (%)	PCr (%)
14/H	Özbay et al., 2024 Diseño cuasiexperimental	22,4±1,8 años. 69,5±3,8 kg 176±5,1 cm	PCr-LA-O2 Atletismo	Sprint 10X20MT 15 Sg pausa tiempo sprint 3,4 sg	14.4 ± 1.3%	24,9 ± 4.3%	60,7 ± 3.8%
10/H	Campos et al., 2012 Diseño cruzado cuasiexperimental	21±6 años 67,2±8,9 kg 176,2±5,3 cm	PCr-LA-O2 Taekwondo	Tres rondas de 2 min Pausa 3 min	66 ± 6%	30 ± 6%)	4 ± 2%
8/M 9/H	Kaufmann et al., 2022 Diseño cruzado cuasiexperimental	21,6±2,8 años 60,3±6,8 kg 175,2±7 cm	PCr-LA-O2 Balonmano	Prueba de suelo gimnasia 71,6 ± 4,7 s	54.4 ± 6,8%	18,9 ± 4.2 %	26.7 ± 8.0 %
18/H	Ulupinar et al., 2022 Diseño cruzado cuasiexperimental	19,9±1,6 años, 177,9±4,7 cm, 72,4±6,3 kg,	PCr-LA-O2 Futbol	Sprint repetido: 20 × 20 m descanso de 15	45 ± 2.4%	12,7 ± 1.1%	42,3 ± 1.1%
13/H	Milioni F et al., 2017 estudio cuasiexperimental	29,9±1,6 años, 173,9± 3,3 cm, 79,6±4,6 kg,	PCr-LA-O2 No deportistas	Sprint repetido 3 series 20m 2 pausa. 6,3 ± 0,4 s	38 ± 3,1%	34 ± 1.2%%	28 ± 3.5%
8/H	Broxterman et al., 2017 Diseño cuasiexperimental	28±5 años 178±4 cm 77±8 kg	Biopsias musculares No deportistas	Sprint en cicloergómetro 20 sg	58 ± 3,1%	34 ± 1,2%	28 ± 3,5%
17/M 16/H	Tortu et al., 2024 Diseño estudio descriptivo y de medidas repetidas,	21.56±2.6 años 180.3±4.4 cm 75.18±6.6 kg	PCr-LA-O2 Deportistas de combate	3 series de 10 seg máximos pausa 2min 30 seg máximos Cicloergometro	H 7.6 ± 2.3% M 8.0 ± 2.6% H 16.8±2.6% M 16.2± 2.5%	31.1 ± 5.7% 28.8 ± 5.0% 34.5 ± 8.3% 38.3 ± 5.5%	61.4 ± 4.9% 63.2 ± 2.4% 48.7 ± 6.9% 45.55 ± 4.2%
11/H	Beneke et al., 2002. Diseño cuasiexperimental	21,6±3,8 años 178,6±6,6 cm 82,2±12,1 kg	PCr-LA-O2 No deportistas	Sprint en cicloergómetro 30 sg	18.6 ± 2.5%	31,1 ± 4,6%	50,3 ± 5.1%
10/H	Bartel et al., 2022 Diseño cuasiexperimental	20,2±4 años, 62,8±10,5 kg 170,6±7,8 cm	PCr-LA-O2 Taekwondo	HIIE Tres rondas de 2 minuto	52.4 ± 4%	48,7 ± 5.4%	6.8 ± 6%
6/H	Bussweiler et al., 2012 Diseño cuasiexperimental	29 ± 8 años 177 ± 5 cm 75 ± 9 kg)	PCr-LA-O2 Taekwondo	Ejercicios de combate 30 sg	23.4 ± 4%	25.7 ± 3.4%	52.8 ± 6%
12/H	Bertuzzi et al., 2007 Diseño cuasiexperimental	27 ± 6 años 179 ± 8 cm 76 ± 4 kg)	PCr-LA-O2 Escalada	Ascenso 50 sg	45.8 ± 8.8%	21.9 ± 6.3%	34.6 ± 11.4%
10/H	Lovell D et al., 2013 Diseño cuasiexperimental	22 ± 4 años 176 ± 2 cm 75 ± 2 kg)	absorciometría de rayos X de energía dual No deportistas	Wingate 30 sg	11.4 ± 1,4 %	60.3 ± 5.6 %	28.3 ± 4.9 %.
11/H	Seemann et al., 2022 Diseño cuasiexperimental	23,6±3,9 65,9±5,6 kg, 171,1±6,7 cm)	PCr-LA-O2 Gimnasia	Ejercicios específico de suelo 20 sg	20.5 ± 5.2%	28,6 ± 4,8%	50.9 ± 6.6%
11/H	Zagatto A et al., 2001 Diseño cuasiexperimental	32,6±3,9 69,8±5,3 kg, 181,1±6,7 cm	PCr-LA-O2 Militares	Carreras de velocidad 20 sg	5.1±0.5%	29,5 ± 1,1%	65.4 ± 1,1%
10/H	Figueiredo et al., 2011 Diseño cuasiexperimental	31,6±3,2 61,8±4,3 kg, 183,1±6,6 cm	PCr-LA-O2 Nadadores	200 m natación estilo crol	65.9±2.5%	13.6±2.2%	20.4±6.7%

Nota: Los datos representan el promedio y desviación estándar. PCr-LA-O2: modelo de tres componentes de distribución de energía aeróbica, anaeróbica láctica y anaeróbica aláctica para la elaboración de perfiles energéticos.

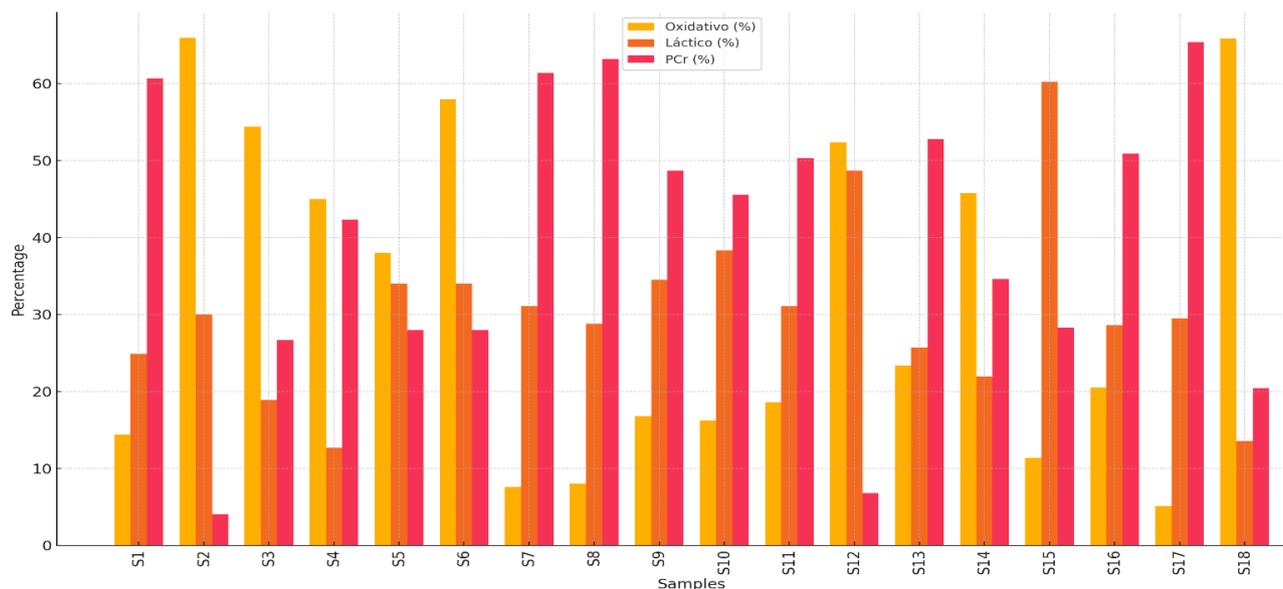


Figura 3. Sistemas energéticos de los estudios en la revisión

El gráfico presenta los porcentajes de las rutas Oxidativa, Láctica y PCr para 18 muestras diferentes. Las muestras evidencian una variabilidad significativa en los porcentajes de cada ruta. Por ejemplo, la Muestra 1 tiene un 14.4% de oxidativo, 24.9% de láctico y 60.7% de PCr, mientras que la Muestra 2 tiene un 66% de oxidativo, 30% de láctico y solo un 4% de PCr. Algunas muestras, como la Muestra 7, tienen un bajo porcentaje de oxidativo (7.6%) y un alto porcentaje de PCr (61.4%). En general, se observa una amplia gama de distribuciones entre las muestras, con algunas dominadas por la ruta oxidativa, otras por la láctica y otras por la PCr. Esto se puede deber a los diferentes pruebas utilizadas en cada estudio.

Resultados

Según nuestros criterios de inclusión, se incluyeron en esta revisión 15 estudios que evaluaron la contribución energética de manera porcentual directa e indirecta en diferentes deportes, en 5 bases de datos. Los registros identificados a partir de cada base de datos fueron: PubMed (n = 74), Scopus (n = 39), Web of Science (n = 87), Cochrane Library (n = 87) y Embase (n = 79), resultando en un total de 366 registros. Figura 2. Diagrama de flujo PRISMA. De estos, 194 sujetos fueron analizados, de los cuales 177 fueron hombres y solo 17 fueron mujeres. Tabla 1. La calidad metodológica de los estudios incluidos se evaluó utilizando (Cochrane ROB) específica para revisiones sistemáticas y Metaanálisis. La figura 1, proporciona una visión general de esta evaluación de calidad de evidencia. Al analizar y comparar la contribución energética de los estudios incluidos, los cuales presentan tiempos de aplicación de 10 a 50 sg. En ejercicios de corta duración, como los investigados por Özbay et al., (2024) y Zagatto A et al., (2001), se observa una alta contribución del sistema de fosfocreatina (PCr),

con valores de 60.7% y 65.4%, respectivamente. Estos estudios utilizan sprints de alta intensidad con pausas breves, lo que requiere una rápida liberación de energía, característica principal del sistema PCr. El sistema de fosfocreatina es crucial en este tipo de ejercicios porque puede proporcionar ATP rápidamente para satisfacer las demandas energéticas inmediatas de las fibras musculares de contracción rápida. Esta vía energética, aunque muy eficiente en términos de velocidad, se agota con rapidez, generalmente en unos pocos segundos de esfuerzo máximo. La contribución láctica también es significativa en estos estudios, con un 24.9% en Özbay et al., y 29.5% en Zagatto A et al., reflejando la necesidad de energía adicional cuando el PCr comienza a agotarse. El sistema láctico, o glucolítico anaeróbico, comienza a tomar un papel más prominente a medida que se agota la PCr, proporcionando energía a través de la descomposición anaeróbica del glucógeno almacenado en los músculos. Esta vía es capaz de suministrar energía rápidamente, aunque a un ritmo más lento que el sistema PCr. La participación oxidativa es relativamente baja en ambos estudios (14.4% y 5.1%), ya que el sistema aeróbico no tiene tiempo suficiente para activarse completamente en estos breves periodos. El sistema oxidativo es el más lento en activarse porque depende del transporte y uso de oxígeno para producir ATP a partir de la oxidación de carbohidratos y grasas. En actividades de muy corta duración y alta intensidad, el oxígeno disponible no es suficiente para contribuir significativamente a la producción de energía, por lo que su participación es mínima.

En ejercicios de duración moderada, comprendidos entre 10 y 30 segundos, se observa una mayor variabilidad en la contribución energética glucolítica y Pcr. Estudios como los de Kaufmann et al., (2022a) y Ullupinar et al., (2022) muestran una notable participación del sistema oxidativo (54.4% y 45%, respectivamente), lo que indica un incre-

mento en la utilización del sistema aeróbico debido a la mayor duración del ejercicio. En el caso de Kaufmann et al., con una duración total de 71.6 segundos, y Ulupinar et al., con sprints repetidos de 20 segundos, se evidencia que el sistema aeróbico comienza a jugar un papel más relevante a medida que la actividad física se prolonga. Además, la contribución de los sistemas láctico y PCr sigue siendo significativa. Kaufmann et al., (2022b) reporta un 18.9% de contribución láctica y un 26.7% del sistema PCr, mientras que Ulupinar et al. muestra un 12.7% de contribución láctica y un 42.3% del sistema PCr. Estos datos subrayan cómo el sistema láctico proporciona energía adicional cuando el sistema PCr se agota, mientras que el sistema oxidativo empieza a contribuir más a medida que la duración del ejercicio aumenta. Otros estudios sobre ejercicios de duración moderada, como los de Milioni et al., (2017) y Broxterman et al., (2017), también muestran esta transición en la contribución energética. Milioni et al., con ejercicios de 6.3 segundos, reporta una contribución oxidativa del 38%, láctica del 34% y PCr del 28%, reflejando un equilibrio entre el uso de PCr y la energía láctica. Broxterman et al., con ejercicios de 20 segundos, muestra una contribución oxidativa más alta (58%), láctica del 34% y PCr del 28%, lo que indica un uso más significativo del sistema aeróbico. En el estudio de Tortu et al., (2024), se investigan dos protocolos: uno de 3 series de 10 segundos y otro de 30 segundos máximos en cicloergómetro. Para las series de 10 segundos, la contribución del sistema PCr es alta (61.4% en hombres y 63.2% en mujeres). Sin embargo, en los ejercicios de 30 segundos, hay una mayor variabilidad con una significativa contribución oxidativa (16.8% en hombres y 16.2% en mujeres) y láctica (34.5% en hombres y 38.3% en mujeres). En los estudios de Beneke et al., (2002) y Lovell D et al., (2013), que investigan ejercicios de 30 segundos, se observan diferentes patrones de contribución energética. Beneke et al., (2002) muestra una distribución más equilibrada entre las tres vías energéticas, con un 18.6% de contribución oxidativa, 31.1% láctica y 50.3% PCr. Por otro lado, Lovell D et al., reporta una alta dependencia del sistema láctico (60.3%) y menor del sistema PCr (28.3%). Finalmente, los estudios de Bartel et al., (2022) y Bussweiler et al., (2012) sobre ejercicios de combate y entrenamiento de intervalos de alta intensidad (HIIE) en taekwondo, también revelan interesantes diferencias. Bartel et al. reporta una contribución láctica muy alta (48.7%) y oxidativa (52.4%), mientras que Bussweiler et al. muestra una contribución más equilibrada (23.4% oxidativa, 25.7% láctica y 52.8% PCr). Esto evidencia cómo la naturaleza del ejercicio y la modalidad específica pueden influir en la distribución de la contribución energética.

En ejercicios de duración prolongada, más de 30 segundos, como los estudiados por Campos et al., (2012) y Figueiredo et al., (2011), la vía oxidativa se convierte en la principal fuente de energía debido a la naturaleza extendida de la actividad física. Campos et al., (2012) investigó tres rondas de 2 minutos en taekwondo, mostrando una contribución oxidativa del 66%, láctica del 30% y PCr del 4%.

Por otro lado, Figueiredo et al., (2011) en un estudio sobre una carrera de 200 metros estilo crol, reportó una contribución oxidativa del 65.9%, láctica del 13.6% y PCr del 20.4%. La similitud en la alta contribución oxidativa entre ambos estudios subraya la importancia del sistema aeróbico en ejercicios de mayor duración. Este predominio del sistema oxidativo es esperado, ya que actividades prolongadas permiten suficiente tiempo para que el metabolismo aeróbico se active plenamente y supla la mayor parte de la energía necesaria para mantener el rendimiento. Sin embargo, es interesante notar la diferencia en la contribución láctica entre los estudios de Campos et al., (2012) y Figueiredo et al., (2011) muestra una contribución láctica significativamente mayor (30% frente al 13.6%).

Esto puede reflejar las distintas demandas energéticas específicas de cada actividad. En el taekwondo, la naturaleza explosiva y repetitiva de las rondas puede requerir una mayor producción de energía rápida a través del sistema láctico, mientras que la carrera de 200 metros estilo crol, aunque intensa, mantiene un ritmo más constante que puede ser mejor sostenido por el sistema oxidativo. Estos hallazgos resaltan la necesidad de considerar las características específicas de cada deporte o actividad física al analizar la contribución energética. Las actividades de larga duración no solo dependen del sistema oxidativo, sino que también pueden variar en la participación de los sistemas láctico y PCr en función de las demandas de la actividad específica y la naturaleza de los esfuerzos involucrados. Este conocimiento es crucial para el diseño de programas de entrenamiento que optimicen el rendimiento energético de los atletas en diferentes disciplinas deportivas.

Es interesante considerar la cinética de metabolismo energético en una condición máxima, según los resultados los sistemas energéticos trabajan de manera integrada y no de forma aislada. Inicialmente, en esfuerzos de alta intensidad y corta duración 10 a 30 sg, la variabilidad de los tres sistemas se compromete según la velocidad de resíntesis de ATP requerida y va cambiando este patrón según la duración del estímulo. Es crucial entender que estos sistemas trabajan de manera integrada. Aunque puede ser útil para ciertos propósitos dividir los sistemas y estudiar sus contribuciones individuales, en la práctica, la eficiencia y rendimiento del atleta dependen de cómo estos sistemas trabajan en conjunto durante el ejercicio.

Discusión

Los principales hallazgos de esta revisión sugieren que la evidencia acumulada sobre los resultados de las diferentes pruebas y la contribución energética cuestiona los conceptos tradicionales de capacidad y potencia anaeróbica láctica y aláctica. Al considerar la interdependencia de las vías metabólicas y su contribución relativa en diversas intensidades de ejercicio, es fundamental integrar este conocimiento en la práctica del entrenamiento deportivo y en la investigación científica para desarrollar estrategias de entrenamiento más efectivas y basadas en la evidencia (Franchini et al., 2016). Además, es esencial que los conceptos teóricos se presenten

de manera precisa y actualizada para reflejar los avances recientes.

El componente anaeróbico puede mantener una proporción mayor de energía en comparación PCr al inicio de ejercicio máximo. Pcr no es exclusivo en condiciones maximales como fuente de energía. Hablar de capacidad y potencia anaeróbica láctica/aláctica desde una concepción mecanicista no sería válido actualmente ya que la energía necesaria durante las actividades principalmente maximales reflejan una interacción dinámica y coordinada entre la fosforilación de ADP mediante fosfocreatina (PCr) como la producción de ATP a través de vías glucolíticas y mitocondriales (Marterer et al., 2023). Por lo tanto, esto desafía el dogma tradicional de dividir el metabolismo anaeróbico en componentes láctico y aláctico desde la perspectiva del entrenamiento físico (Harvey et al., 2015; Ferretti et al., 2022). La base de esta información se sustenta de los principales estudios donde se describió el funcionamiento primario del metabolismo generando ciertas ideas y conceptos que actualmente perdura (Borg y Caulfield 1980). Sin embargo, actualmente se han establecido la interrelación entre los componentes enzimáticos celulares de las vías energéticas dentro de la función muscular, en términos de fluctuaciones energéticas o demandas inducidas por el ejercicio físico, se debe a la activación y/o represión de vías y procesos moleculares en respuesta del ejercicio agudo (Van Loon et al., 2001; Sergeeva et al., 2024). Estas vías incluyen la transducción de señales que surgen de estímulos neuronales, mecánicos, metabólicos y hormonales a través de redes complejas de transducción de señales, vinculadas a una miríada de proteínas efectoras implicadas en la regulación de los procesos pre y postranscripcionales, así como en los procesos de traducción y degradación de proteínas (Hermosilla et al., 2024; Molinar et al., 2023). La activación de estas vías de señalización resulta en adaptaciones específicas del músculo esquelético, que incluyen cambios en la expresión génica y la síntesis de proteínas, afectando la capacidad del músculo para generar y utilizar energía (Franchi et al., 2018). Considerando la cantidad total de ATP almacenada dentro de las células del cuerpo es muy pequeña (aproximadamente 8 mmol/kg de peso húmedo de músculo). Por lo tanto, las células dependen de otros mecanismos para suministrar ATP para apoyar el trabajo celular, lo que implica el almacenamiento de energía en moléculas más complejas como el glucógeno y los triacilglicérols, y lo que es más importante, tener un sistema de control sensible para aumentar rápidamente el metabolismo durante los momentos de demanda de energía (ATP) (Glaister M. 2005) en este sentido la vía de la AMP-activated protein kinase (AMPK). AMPK es el principal sensor de energía y regulador de la homeostasis energética en eucariotas. Se activa por estrés energético en respuesta al aumento del consumo de ATP (p. ej., ejercicio, proliferación celular, anabolismo) o disminución de la producción de ATP (p. ej., niveles bajos de glucosa, estrés oxidativo, hipoxia), que se detectan como proporciones bajas de ATP a AMP y ADP (Lee HJ et al., 2019). Tras la

activación, la AMPK fosforila objetivos posteriores para modular directa o indirectamente las actividades de enzimas metabólicas limitantes de la velocidad, factores de transcripción y traducción, vías de proliferación y crecimiento, y reguladores epigenéticos (Ovens et al., 2021; Yan et al., 2018). Por otro lado, la mTOR (mammalian target of rapamycin) es una vía de señalización que responde a estímulos de crecimiento y nutrientes, promoviendo la síntesis de proteínas y el crecimiento muscular. La interacción entre estas vías permite una regulación precisa del metabolismo energético en respuesta a diferentes tipos de ejercicio (Zheng T et al., 2015; Vara et al., 2019). Por ejemplo, el ATP muscular disminuye solo entre 1 y 2 mmol/kg de peso húmedo durante estas condiciones, e incluso con una contracción máxima involuntaria hasta la falla contráctil, el ATP muscular no baja de 5 mmol/kg de peso húmedo según Spriet LL (1992). La reposición de ATP durante el ejercicio intenso es el resultado de una respuesta metabólica coordinada en la que todos los sistemas de energía contribuyen en diferentes grados en función de una interacción entre la intensidad y la duración del ejercicio y, en consecuencia, la contribución proporcional de las diferentes unidades motoras del músculo esquelético, por lo tanto, no se puede asumir la interacción individual de los sistemas energéticos principalmente bajo un escenario maximal (Campbell et al., 2001; Pranoto et al., 2024). Esta respuesta coordinada refleja la interacción y la integración de los sistemas de energía que trabajan en conjunto para satisfacer las demandas energéticas. Los estudios informados describen principalmente la tendencia de la Pcr a contribuir con mayor proporción en los primeros segundos de la resíntesis de ATP, a disminuir su proporción con el tiempo por ejemplo dentro de algunos estudio como los de Özbay et al., 2024 (14/H) Sprint 10 × 20 m (15 s pausa, tiempo sprint 3.4 s) 60.7 ± 3.8% PCr. Tortu et al., 2024 (17/M, 16/H) 3 series de 10 s máximos (pausa 2 min) H: 61.4 ± 4.9%, M: 63.2 ± 2.4%. Beneke et al., 2002 (11/H) Sprint en cicloergómetro (30 s) 50.3 ± 5.1% Ullupmar et al., 2022 (18/H) Sprint repetido: 20 × 20 m (descanso de 15 s) 42.3 ± 1.1%. Bertuzzi et al., 2007 (12/H) Ascenso (50 s) 34.6 ± 11.4% Kaufmann et al., 2022 (8/M, 9/H) Prueba de suelo gimnasia (71.6 ± 4.7 s) 26.7 ± 8.0%. Bartel et al., 2022 (10/H) HIIT (Tres rondas de 2 min) 6.8 ± 6%. Campos et al., 2012 (10/H) Tres rondas de 2 min (Pausa 3 min) 4 ± 2%. Esto se puede explicar por diferentes condiciones, la demanda instantánea de energía, la inercia parcial del sistema glucolítico, el depósito de PCr en el músculo en reposo es de aproximadamente 26 mmol/kg de peso húmedo, 3 a 5 veces superior a la concentración de ATP, además la única reacción de la CK junto con la presencia de subunidades CK mitocondriales (lanzadera" de fosfocreatina), permite una resíntesis de ATP casi instantánea. Sweeney HL (1994), en conjunto con la reacción de la adenilato quinasa (Verzijl et al., 1995). Además, el consumo de protones (H⁺) durante la reacción de la creatina quinasa explica la ligera alcalinización del músculo al inicio del ejercicio. Otra característica importante del sistema de los fosfógenos, y en

particular la reacción de la adenilato quinasa, es la producción de AMP. Y es aquí en donde un sistema enlaza al otro Pcr/glucólisis, el AMP es un potente activador alostérico de dos enzimas que influyen en la glucólisis. En primer lugar, el AMP activa la fosforilasa, que aumenta la glucogenólisis y, por lo tanto, la tasa de producción de glucosa-6-fosfato (G₆P), que a su vez proporciona combustible inmediato para la glucólisis. En segundo lugar, el AMP activa la fosfofructoquinasa (PFK) dentro de la fase 1 de la glucólisis, lo que permite un mayor flujo de G6P a través de la glucólisis, lo que a su vez permite mayores tasas de regeneración de ATP en el tiempo específico que se agotan las reservas de PCr. Lo que explicaría la menor contribución de la glucólisis en instancias primarias dentro de los primeros 6 sg. Es interesante considerar además los valores de Milioni F et al., 2017. Con un Protocolo de Sprint repetido de tres series de 20 m con una duración de (6.3±0.4 s) descanso de 2 minutos. Se puede apreciar los resultados bastante proporcional para los sistemas PCr: 28 ± 3.5% Glucólisis: 34±1.2% y el Metabolismo Oxidativo: 38±3.1% esto se puede explicar por las series realizadas. Tortu et al., 2024 con 3 series de 10 s máximos, pausa 2 min: Hombres: PCr: 61.4 ± 4.9% Glucólisis: 31.1 ± 5.7% y Metabolismo Oxidativo: 7.6 ± 2.3%. A pesar de que la duración del protocolo de Milioni F et al., 2017 con una duración de 6.3±0.4 sg. el predominio de la glucólisis en este caso es bastante interesante. Lo que podría ser explicado por la máxima actividad de la glucógeno fosforilasa y la actividad de la PFK que se alcanza en los primeros 6 sg. en un esfuerzo máximo según Parolin et al., (2000) manteniendo su tasa máxima hasta los 15 segundos (Weneger y Krause 2002; Glancy et al., 2021). Lo que podría explicar los resultados de Tortu et al., 2024. Además, la glucólisis implica varias reacciones más que cualquier componente del sistema de fosfágenos, lo que disminuye ligeramente la tasa máxima de regeneración de ATP. Sin embargo, existen datos donde la glucólisis ha predominado en los primeros 6 segundos (Karatzaferi et al., 2001; Milioni et al., 2017). Existen tendencias estadísticas que describen principalmente predominio bastante claro sobre los 15 segundos de la glucólisis (Di Prampero 2003). Además, la capacidad máxima de regeneración de ATP a partir de la glucólisis se logra cuando una tasa de trabajo que requiere una carga energética mayor que el consumo máximo de oxígeno de un individuo (Vo₂ máximo) se realiza durante el mayor tiempo posible, que para el atleta medio entrenado es de entre 2 y 3 minutos (Medbø 1993; Mc lester et al., 2023). Es importante considerar que al igual que la conexión que existe entre PCr y glucólisis, también está la conexión entre las mitocondrias y la glucólisis que se manifiesta en todo momento metabólico cuando se completa el piruvato y los electrones y protones de la reducción glucolítica de NAD⁺ a NADH se transfieren a las mitocondrias como sustratos para la respiración mitocondrial. El sistema de energía aeróbica responde sorprendentemente rápido a las demandas del ejercicio intenso, pero debido a una tasa relativamente baja de recambio de ATP, es incapaz de satisfacer las demandas energéticas al comienzo del ejercicio, independientemente de la intensidad del ejercicio o de lo intenso que

sea. Sin embargo, ahora parece evidente que el sistema aeróbico desempeña un papel importante en la determinación del rendimiento durante el ejercicio de alta intensidad, con un esfuerzo máximo de ejercicio de 75 segundos que deriva aproximadamente la misma energía de los sistemas de energía aeróbica y anaeróbica. Por lo tanto, los sistemas energéticos poseen latencias específicas que obedecen a los patrones de actividad muscular y están estrechamente integrados, operando en conjunto para satisfacer los requerimientos energéticos del músculo esquelético (Van Someren, 2006; Burnley et al., 2010). Aunque se ha teorizado durante mucho tiempo que, durante los primeros 10 a 15 segundos de ejercicio, el fosfato de creatina (PCr) era el único responsable de la regeneración de ATP (Bogdanis et al., 1996; Casey et al., 1996), la evidencia reciente sugiere una visión más compleja. Los sistemas energéticos no funcionan de manera aislada; más bien, se interrelacionan dinámicamente, con la PCr desempeñando un papel crucial pero no exclusivo, especialmente durante ejercicios de alta intensidad y corta duración. La integración de la fosforilación de ADP mediante PCr y la producción de ATP a través de vías glucolíticas y mitocondriales revela una coordinación sofisticada que permite una respuesta eficiente a las demandas energéticas cambiantes. Esta perspectiva actualizada subraya la necesidad de revisar y ajustar los conceptos tradicionales de capacidad y potencia anaeróbica láctica/aláctica para reflejar mejor la realidad dinámica del metabolismo energético durante el ejercicio. Para generar lineamientos específicos de entrenamiento basados en las perspectivas actualizadas del metabolismo energético, es esencial incorporar los hallazgos recientes sobre la interrelación y el papel dinámico de los sistemas energéticos. Una versión mejorada de la descripción de los términos adecuados para describir los distintos aspectos del metabolismo energético durante el ejercicio maximal sería capacidad anaeróbica: se refiere a la habilidad del cuerpo para ejecutar esfuerzos intensos a corto plazo, en los que predominan los sistemas energéticos anaeróbicos, tales como el sistema de fosfágenos (PCr) y la glucólisis. Esta capacidad incluye la habilidad para mantener un alto nivel de rendimiento en esfuerzos máximos o casi máximos durante un corto período de tiempo, como en sprints o levantamientos de pesas. Y potencia anaeróbica: Mide la cantidad máxima de trabajo o potencia que puede ser generada en un breve período de tiempo utilizando los sistemas anaeróbicos (Fosfágenos (PCr) y la glucólisis). Esta definición mejorada proporciona una visión clara de los conceptos de capacidad y potencia anaeróbica, destacando la importancia de los sistemas energéticos involucrados y su papel en el rendimiento durante el ejercicio.

Conclusión

La revisión y actualización de los conceptos tradicionales de capacidad y potencia anaeróbica son esenciales para reflejar una comprensión más precisa y dinámica del metabolismo energético durante el ejercicio. La evidencia actual demuestra que las vías metabólicas, incluyendo el sistema de fosfocreatina (PCr) y el metabolismo oxidativo, están interrelacionadas y contribuyen simultáneamente a la producción de

ATP durante el ejercicio, independientemente de la intensidad y duración de este. Esta interacción dinámica desafía el modelo clásico que divide el metabolismo anaeróbico en componentes láctico y aláctico. Es interesante considerar la interdependencia de las vías metabólicas y su contribución relativa en diversas intensidades de ejercicio.

Aplicación práctica

Diseño de Programas de Entrenamiento: La comprensión de la interacción entre las vías metabólicas permite diseñar programas de entrenamiento más efectivos y personalizados. Los entrenadores pueden ajustar la intensidad y la duración del ejercicio para optimizar la contribución de las vías PCr y oxidativa según los objetivos específicos del deportista. Evaluación del Rendimiento Deportivo: La integración de la información sobre las vías metabólicas en la evaluación del rendimiento puede ayudar a identificar áreas de mejora y adaptar las estrategias de entrenamiento para mejorar la eficiencia energética y la resistencia.

Limitaciones

Variabilidad Individual: Las respuestas metabólicas al ejercicio pueden variar ampliamente entre individuos debido a diferencias genéticas, nivel de entrenamiento y estado de salud. Esto puede dificultar la generalización de los resultados y la aplicación de estrategias uniformes. Control de Variables: Los estudios que investigan las vías metabólicas a menudo enfrentan desafíos en el control de variables externas, como la nutrición, el sueño y el estrés, que pueden influir en los resultados y complicar la interpretación de los datos. Metodología de Investigación: La precisión en la medición de las contribuciones relativas de los sistemas de energía (PCr y oxidativo) puede verse limitada por las técnicas utilizadas y la variabilidad en los protocolos experimentales. Actualización de Terminología: La evolución continua en la comprensión de los conceptos metabólicos requiere una actualización constante de la terminología y los modelos teóricos, lo que puede ser un desafío en la práctica y la comunicación científica.

Conflicto de intereses

No se declaran conflictos.

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro profundo agradecimiento a los numerosos investigadores cuyos trabajos han sido fundamentales para avanzar en nuestro entendimiento acerca del metabolismo energético.

Referencias

- Bangsbo, J. (1998). Cuantificación de la producción de energía anaeróbica durante el ejercicio intenso. *Medicina y ciencia en deportes y ejercicio*, 30(1), 47-52. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=54222981005>
- Ab, A., Rhibi, Ouerghi, Ac, H., Saeidi, & Zouhal. (2018). Effects of recovery mode during high intensity interval training on glucoregulatory hormones and glucose metabolism in response to maximal exercise. *Journal of athletic enhancement*, 07(03). <https://doi.org/10.4172/2324-9080.1000292>
- Abdollahi Diba, M., Sari Sarraf, V., Amirsasan, R., & Dabagh Nikoukheslat, S. (2024). Effect of a 12-week high-calorie-expenditure multimodal exercise program on health indices in women with overweight: Protocol for a randomized controlled trial. *JMIR Research Protocols*, 13, e51599. <https://doi.org/10.2196/51599>
- Bakermans, A. J., Wessel, C. H., Zheng, K. H., Groot, P. F. C., Stroes, E. S. G., & Nederveen, A. J. (2020). Dynamic magnetic resonance measurements of calf muscle oxygenation and energy metabolism in peripheral artery disease. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, 51(1), 98–107. <https://doi.org/10.1002/jmri.26841>
- Balaban, R. S. (1990a). Regulation of oxidative phosphorylation in the mammalian cell. *American Journal of Physiology. Cell Physiology*, 258(3), C377–C389. <https://doi.org/10.1152/ajpcell.1990.258.3.c377>
- Balaban, R. S. (1990b). Regulation of oxidative phosphorylation in the mammalian cell. *American Journal of Physiology. Cell Physiology*, 258(3), C377–C389. <https://doi.org/10.1152/ajpcell.1990.258.3.c377>
- Bangsbo, J. (1996). Oxygen deficit: A measure of the anaerobic energy production during intense exercise? *Canadian Journal of Applied Physiology*, 21(5), 350–363. <https://doi.org/10.1139/h96-031>
- Bangsbo, J. (1998). Quantification of anaerobic energy production during intense exercise. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 30(1), 47–52. <https://doi.org/10.1097/00005768-199801000-00007>
- Bartel, C., Coswig, V. S., Protzen, G. V., & Del Vecchio, F. B. (2022a). Energy demands in high-intensity intermittent taekwondo specific exercises. *PeerJ*, 10(e13654), e13654. <https://doi.org/10.7717/peerj.13654>
- Bartel, C., Coswig, V. S., Protzen, G. V., & Del Vecchio, F. B. (2022b). Energy demands in high-intensity intermittent taekwondo specific exercises. *PeerJ*, 10(e13654), e13654. <https://doi.org/10.7717/peerj.13654>
- Beinert, H., Boyer, P. D., Lardy, H., & Myrbäck, K. (1963). The oxygen, chapter 17. 17, 447–476.
- Bendahan, D., Chatel, B., & Jue, T. (2017). Comparative NMR and NIRS analysis of oxygen-dependent metabolism in exercising finger flexor muscles. *American Jour-*

- nal of Physiology. Regulatory, Integrative and Comparative Physiology, 313(6), R740–R753. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00203.2017>
- Beneke, Pollmann, Bleif, Leithäuser, & Hütler. (2002). How anaerobic is the Wingate Anaerobic Test for humans? European journal of applied physiology, 87(4–5), 388–392. <https://doi.org/10.1007/s00421-002-0622-4>
- Beneke, R., Hütler, M., & Leithäuser, R. M. (2007). Rendimiento anaeróbico y metabolismo en niños y adolescentes varones. Revista europea de fisiología aplicada, 101.
- Benz, R., Kottke, M., & Brdiczka, D. (1990a). The cationically selective state of the mitochondrial outer membrane pore: a study with intact mitochondria and reconstituted mitochondrial porin. Biochimica et Biophysica Acta. Biomembranes, 1022(3), 311–318. [https://doi.org/10.1016/0005-2736\(90\)90279-w](https://doi.org/10.1016/0005-2736(90)90279-w)
- Benz, R., Kottke, M., & Brdiczka, D. (1990b). The cationically selective state of the mitochondrial outer membrane pore: a study with intact mitochondria and reconstituted mitochondrial porin. Biochimica et Biophysica Acta. Biomembranes, 1022(3), 311–318. [https://doi.org/10.1016/0005-2736\(90\)90279-w](https://doi.org/10.1016/0005-2736(90)90279-w)
- Bertuzzi, R. C. de M., Franchini, E., Kokubun, E., & Kiss, M. A. P. D. M. (2007). Energy system contributions in indoor rock climbing. European Journal of Applied Physiology, 101(3), 293–300. <https://doi.org/10.1007/s00421-007-0501-0>
- Bessman, S. P. (1972). Teoría de la acción de la insulina basada en el aceptor de la hexoquinasa. Nueva evidencia. Isr J Med Sci, 8(3), 344–352.
- Bessman, S. P., & Geiger, P. J. (1981). Transporte de energía en el músculo: la lanzadera de fosforilcreatina. Science, 211(4481), 448–452.
- Billaut, F., Giacconi, M., & Falgairette, G. (2003). Maximal intermittent cycling exercise: effects of recovery duration and gender. Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985), 95(4), 1632–1637. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00983.2002>
- Bogdanis, G. C., Nevill, M. E., Boobis, L. H., & Lakomy, H. K. (1996). Contribution of phosphocreatine and aerobic metabolism to energy supply during repeated sprint exercise. Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985), 80(3), 876–884. <https://doi.org/10.1152/jappl.1996.80.3.876>
- Bogdanis, G. C., Nevill, M. E., Lakomy, H. K. A., & Boobis, L. H. (1998). Power output and muscle metabolism during and following recovery from 10 and 20 s of maximal sprint exercise in humans. Acta Physiologica Scandinavica, 163(3), 261–272. <https://doi.org/10.1046/j.1365-201x.1998.00378.x>
- Bogdanis, G., Nevill, M., & Lakomy, H. (1994). Efectos del ejercicio dinámico previo con los brazos en la potencia de salida durante el ciclismo de velocidad máxima repetida. Revista de ciencias del deporte, 12.
- Borg, T. K., & Caulfield, J. B. (1980). Morphology of connective tissue in skeletal muscle. Tissue & Cell, 12(1), 197–207. [https://doi.org/10.1016/0040-8166\(80\)90061-0](https://doi.org/10.1016/0040-8166(80)90061-0)
- Brooks, G. A. (2009). Cell–cell and intracellular lactate shuttles. The Journal of Physiology, 587(23), 5591–5600. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2009.178350>
- Brooks, G. A. (2012). Bioenergetics of exercising humans. En Comprehensive Physiology (pp. 537–562). Wiley. <https://doi.org/10.1002/cphy.c110007>
- Brooks, G. A. (2018). The science and translation of lactate shuttle theory. Cell Metabolism, 27(4), 757–785. <https://doi.org/10.1016/j.cmet.2018.03.008>
- Broxterman, R. M., Layec, G., Hureau, T. J., Amann, M., & Richardson, R. S. (2017). Skeletal muscle bioenergetics during all-out exercise: mechanistic insight into the oxygen uptake slow component and neuromuscular fatigue. Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985), 122(5), 1208–1217. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.01093.2016>
- Burnley, M., Vanhatalo, A., Fulford, J., & Jones, A. M. (2010). Similar metabolic perturbations during all-out and constant force exhaustive exercise in humans: a ³¹P magnetic resonance spectroscopy study. Experimental Physiology, 95(7), 798–807. <https://doi.org/10.1113/expphysiol.2010.052688>
- Bussweiler, J., & Hartmann, U. (2012). Energetics of basic karate Kata. European Journal of Applied Physiology, 112(12), 3991–3996. <https://doi.org/10.1007/s00421-012-2383-z>
- Campbell-O'Sullivan, S. P., Constantin-Teodosiu, D., Peirce, N., & Greenhaff, P. L. (2002). Low intensity exercise in humans accelerates mitochondrial ATP production and pulmonary oxygen kinetics during subsequent more intense exercise. The Journal of Physiology, 538(3), 931–939. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2001.013238>
- Campos, F. A. D., Bertuzzi, R., Dourado, A. C., Santos, V. G. F., & Franchini, E. (2012). Energy demands in taekwondo athletes during combat simulation. European Journal of Applied Physiology, 112(4), 1221–1228. <https://doi.org/10.1007/s00421-011-2071-4>
- Casey, A., Constantin-Teodosiu, D., Howell, S., Hultman, E., & Greenhaff, P. L. (1996). Metabolic response of type I and II muscle fibers during repeated bouts of maximal exercise in humans. American Journal of Physiology. Endocrinology and Metabolism, 271(1), E38–E43. <https://doi.org/10.1152/ajpendo.1996.271.1.e38>
- Chamari, K., Ahmaidi, S., Blum, J. Y., Hue, O., Temfemo, A., Hertogh, C., Mercier, B., Prefaut, C., & Mercier, J. (2001). Venous blood lactate increase after vertical jumping in volley ball athletes. Eur J Appl Physiol, 85–191.
- Dawson, B., Goodman, C., Lawrence, S., Preen, D., Polglaze, T., Fitzsimons, M., & Fournier, P. (1997). Muscle phosphocreatine repletion following single and repeated short sprint efforts. Scandinavian Journal of

- Medicine & Science in Sports, 7(4), 206–213. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.1997.tb00141.x>
- de Campos Mello, F., de Moraes Bertuzzi, R. C., Grangeiro, P. M., & Franchini, E. (2009). Energy systems contributions in 2,000 m race simulation: a comparison among rowing ergometers and water. *European Journal of Applied Physiology*, 107(5), 615–619. <https://doi.org/10.1007/s00421-009-1172-9>
- di Prampero, P. E. (2003). Factors limiting maximal performance in humans. *European Journal of Applied Physiology*, 90(3–4), 420–429. <https://doi.org/10.1007/s00421-003-0926-z>
- Dunst, A., Manunzio, C., Feldmann, A., & Hesse, C. (2023a). Applications of near-infrared spectroscopy in “anaerobic” diagnostics – SmO₂ kinetics reflect PCr dephosphorylation and correlate with maximal lactate accumulation and maximal pedalling rate. *Biology of sport*, 40(4), 1019–1031. <https://doi.org/10.5114/biol sport.2023.122481>
- Dunst, A., Manunzio, C., Feldmann, A., & Hesse, C. (2023b). Applications of near-infrared spectroscopy in “anaerobic” diagnostics – SmO₂ kinetics reflect PCr dephosphorylation and correlate with maximal lactate accumulation and maximal pedalling rate. *Biology of sport*, 40(4), 1019–1031. <https://doi.org/10.5114/biol sport.2023.122481>
- Ferretti, G., Fagoni, N., Taboni, A., Bruseghini, P., & Vinetti, G. (2017). The physiology of submaximal exercise: The steady state concept. *Respiratory Physiology & Neurobiology*, 246, 76–85. <https://doi.org/10.1016/j.resp.2017.08.005>
- Ferretti, G., Fagoni, N., Taboni, A., Vinetti, G., & di Prampero, P. E. (2022). A century of exercise physiology: key concepts on coupling respiratory oxygen flow to muscle energy demand during exercise. *European Journal of Applied Physiology*, 122(6), 1317–1365. <https://doi.org/10.1007/s00421-022-04901-x>
- Franchi, M. V., Longo, S., Mallinson, J., Quinlan, J. I., Taylor, T., Greenhaff, P. L., & Narici, M. V. (2018). Muscle thickness correlates to muscle cross-sectional area in the assessment of strength training-induced hypertrophy. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 28(3), 846–853. <https://doi.org/10.1111/sms.12961>
- Franchini, E., Takito, M. Y., & Dal’Molin Kiss, M. A. P. (2016). Performance and energy systems contributions during upper-body sprint interval exercise. *Journal of Exercise Rehabilitation*, 12(6), 535–541. <https://doi.org/10.12965/jer.1632786.393>
- Gaitanos, G. C., Williams, C., Boobis, L. H., & Brooks, S. (1993). Human muscle metabolism during intermittent maximal exercise. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)*, 75(2), 712–719. <https://doi.org/10.1152/jappl.1993.75.2.712>
- Gastin, P. B. (2001). Energy system interaction and relative contribution during maximal exercise. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 31(10), 725–741. <https://doi.org/10.2165/00007256-200131100-00003>
- Glaister, M. (2005). Multiple sprint work: Physiological responses, mechanisms of fatigue and the influence of aerobic fitness. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 35(9), 757–777. <https://doi.org/10.2165/00007256-200535090-00003>
- Glancy, B., Kane, D. A., Kavazis, A. N., Goodwin, M. L., Willis, W. T., & Gladden, L. B. (2021). Mitochondrial lactate metabolism: history and implications for exercise and disease. *The Journal of Physiology*, 599(3), 863–888. <https://doi.org/10.1113/jp278930>
- Green, S., & Dawson, B. (1993). Measurement of anaerobic capacities in humans: Definitions, limitations and unsolved problems. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 15(5), 312–327. <https://doi.org/10.2165/00007256-199315050-00003>
- Greenhaff, P. L. (2001). The creatine-phosphocreatine system: there’s more than one song in its repertoire. *The Journal of Physiology*, 537(3), 657–657. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7793.2001.00657.x>
- Greenhaff, P. L. (2003). Milestones in human physiology: Muscle energy metabolism and blood flow during contraction. *The Journal of Physiology*, 551(Pt 2), 397–399. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2003.044412>
- Gudbjarnason, S., Mathes, P., & Ravens, K. G. (1970). Compartimentación funcional de ATP y fosfato de creatina en el músculo cardíaco. *J Mol Cell Cardiol*, 1(3), 325–339.
- Harvey, L., Wiegand, A., Solomon, C., Mclellan, C., & Lovell, D. (2015). A comparison of upper and lower body energetics during high-intensity exercise. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 55(7–8), 708–713.
- Hawley, J. A., Hargreaves, M., Joyner, M. J., & Zierath, J. R. (2014). Integrative biology of exercise. *Cell*, 159(4), 738–749. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2014.10.029>
- Hermosilla Palma, F., Merino Muñoz, P., Marilaf Hormazábal, M., Aguilar Salazar, P., Vergara Otárola, B., Miarka, B., Aedo Muñoz, E., & Pérez Contreras, J. (2024). Asociación entre la aptitud física aeróbica y metabolismo glucolítico en futbolistas profesionales varones adultos (Association between aerobic fitness and glycolytic metabolism in adult male professional football players). *Retos digital*, 53, 508–513. <https://doi.org/10.47197/retos.v53.100553>
- Hill, A. V., & Lupton, H. (1923). Ejercicio muscular, ácido láctico y el suministro y utilización de oxígeno. *QJ Med*, 16, 135–171.
- Jacobs, H., Heldt, H. W., & Klingenberg, M. (1964). Alta actividad de la creatina quinasa en mitocondrias de

- músculos y cerebro y evidencia de una isoenzima mitocondrial separada de la creatina quinasa. *Biochem Biophys Res Commun*, 16(6), 516–521.
- Jones, N. L., McCartney, N., Graham, T., Spriet, L. L., Kowalchuk, J. M., Heigenhauser, G. J., & Sutton, J. R. (1985). Muscle performance and metabolism in maximal isokinetic cycling at slow and fast speeds. *Journal of Applied Physiology* (Bethesda, Md.: 1985), 59(1), 132–136. <https://doi.org/10.1152/jappl.1985.59.1.132>
- Karatzaféri, C., de Haan, A., Ferguson, R., van Mechelen, W., & Sargeant, A. (2001). Phosphocreatine and ATP content in human single muscle fibres before and after maximum dynamic exercise. *Pflügers Archiv: European Journal of Physiology*, 442(3), 467–474. <https://doi.org/10.1007/s004240100552>
- Kaufmann, S., Latzel, R., Beneke, R., & Hoos, O. (2022). Reliability of the 3-component model of aerobic, anaerobic lactic, and anaerobic alactic energy distribution (PCr-LA-O2) for energetic profiling of continuous and intermittent exercise. *International journal of sports physiology and performance*, 17(11), 1642–1648. <https://doi.org/10.1123/ijspp.2022-011>
- Krebs, H. A., & Kornberg, H. (1957). *Transformación de energía en materia viva*. Springer.
- Krogh, A., & Lindhard, J. (1920). The changes in respiration at the transition from work to rest. *The Journal of Physiology*, 53(6), 431–439. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1920.sp001889>
- Layec, G., Malucelli, E., Le Fur, Y., Manners, D., Yashiro, K., Testa, C., Cozzone, P. J., Iotti, S., & Bendahan, D. (2013). Effects of exercise-induced intracellular acidosis on the phosphocreatine recovery kinetics: a ³¹P MRS study in three muscle groups in humans. *NMR in Biomedicine*, 26(11), 1403–1411. <https://doi.org/10.1002/nbm.2966>
- Lee, H. J., Moon, J., Chung, I., Chung, J. H., Park, C., Lee, J. O., Han, J. A., Kang, M. J., Yoo, E. H., Kwak, S.-Y., Jo, G., Park, W., Park, J., Kim, K. M., Lim, S., Ngoei, K. R. W., Ling, N. X. Y., Oakhill, J. S., Galic, S., ... Kim, H. S. (2019). ATP synthase inhibitory factor 1 (IF1), a novel myokine, regulates glucose metabolism by AMPK and Akt dual pathways. *FASEB Journal: Official Publication of the Federation of American Societies for Experimental Biology*, 33(12), 14825–14840. <https://doi.org/10.1096/fj.201901440rr>
- Lovell, D., Kerr, A., Wiegand, A., Solomon, C., Harvey, L., & McLellan, C. (2013). The contribution of energy systems during the upper body Wingate anaerobic test. *Applied Physiology Nutrition and Metabolism*, 38(2), 216–219. <https://doi.org/10.1139/apnm-2012-0101>
- Mader, A. (2003a). Glycolysis and oxidative phosphorylation as a function of cytosolic phosphorylation state and power output of the muscle cell. *European Journal of Applied Physiology*, 88(4), 317–338. <https://doi.org/10.1007/s00421-002-0676-3>
- Mader, A. (2003b). Glycolysis and oxidative phosphorylation as a function of cytosolic phosphorylation state and power output of the muscle cell. *European Journal of Applied Physiology*, 88(4), 317–338. <https://doi.org/10.1007/s00421-002-0676-3>
- Margaria, R., Cerretelli, P., di Prampero, P. E., Massari, C., & Torelli, G. (1963). Kinetics and mechanism of oxygen debt contraction in man. *Journal of Applied Physiology* (Bethesda, Md.: 1985), 18(2), 371–377. <https://doi.org/10.1152/jappl.1963.18.2.371>
- Margaria, R., Cerretelli, P., & Mangili, F. (1964). Balance and kinetics of anaerobic energy release during strenuous exercise in man. *Journal of Applied Physiology* (Bethesda, Md.: 1985), 19(4), 623–628. <https://doi.org/10.1152/jappl.1964.19.4.623>
- Margaria, R., Edwards, R., & Dill, D. B. (1933). Los posibles mecanismos de contracción y pago de la deuda de oxígeno y el papel del ácido láctico en la contracción muscular. *Am J Physiol*, 106, 689–715.
- Margaria, Rodolfo. (1968). Capacity and power of the energy processes in muscle activity: Their practical relevance in athletics. *European Journal of Applied Physiology*, 25(4), 352–360. <https://doi.org/10.1007/bf00699625>
- Marterer, N., Mugele, H., Schäfer, S. K., & Faulhaber, M. (2023). Effects of upper body exercise training on aerobic fitness and performance in healthy people: A systematic review. *Biology*, 12(3), 355. <https://doi.org/10.3390/biology12030355>
- McLESTER, C. N., Rooks, R., McLESTER, J. R., Bechke, E., Williamson, C., & Kliszczewicz, B. M. (2023). A comparison of anaerobic power tests using cycle ergometry and nonmotorized treadmill ergometry at optimized loads. *International Journal of Exercise Science*, 16(4), 1293–1305.
- Medbo, J. I., & Tabata, I. (1993). Anaerobic energy release in working muscle during 30 s to 3 min of exhausting bicycling. *Journal of Applied Physiology* (Bethesda, Md.: 1985), 75(4), 1654–1660. <https://doi.org/10.1152/jappl.1993.75.4.1654>
- Meyerhof, O. (1920). Las paredes energéticas en Muskel III. Hidrato de colina y solución de suero de leche en el almizcle blanco. *Pflügers Arch ges Physiol*, 185, 11–32.
- Meyerspeer, M., Boesch, C., Cameron, D., Dezortová, M., Forbes, S. C., Heerschap, A., Jeneson, J. A. L., Kan, H. E., Kent, J., Layec, G., Prompers, J. J., Reyngoudt, H., Sleigh, A., Valkovič, L., Kemp, G. J., & Experts' Working Group on P MR Spectroscopy of Skeletal Muscle. (2021). ³¹P magnetic resonance spectroscopy in skeletal muscle: Experts' consensus recommendations. *NMR in Biomedicine*, 34(5). <https://doi.org/10.1002/nbm.4246>
- Milioni, F., Zagatto, A., Barbieri, R., Andrade, V., dos Santos, J., Gobatto, C., da Silva, A., Santiago, P., & Papoti, M. (2017). Energy systems contribution in the

- running-based anaerobic sprint test. *International Journal of Sports Medicine*, 38(03), 226–232. <https://doi.org/10.1055/s-0042-117722>
- Mitchell, P. (1979). Compartmentation and communication in living systems. Ligand conduction: A general catalytic principle in chemical, osmotic and chemiosmotic reaction systems. *European Journal of Biochemistry*, 95(1), 1–20. <https://doi.org/10.1111/j.1432-1033.1979.tb12934.x>
- Mohr, A. E., Ramos, C., Tavarez, K., & Arciero, P. J. (2020). Lower postprandial thermogenic response to an unprocessed whole food meal compared to an Iso-energetic/macronutrient meal replacement in young women: A single-blind randomized cross-over trial. *Nutrients*, 12(8), 2469. <https://doi.org/10.3390/nu12082469>
- Molinar Contreras, M., Perez Garcia, A. I., Ramos-Jiménez, A., Hernández Torres, R. P., & Chavez-Guevara, I. A. (2023). Aplicaciones de la Máxima Oxidación de Grasas y FATmax en la evaluación del rendimiento deportivo en atletas-de resistencia-: una revisión narrativa (Applications of Maximum Fat Oxidation and FATmax in the evaluation of sports performance in endurance-athletes: a narrative review). *Retos digital*, 47, 806–813. <https://doi.org/10.47197/retos.v47.95197>
- Niess, F., Schmid, A. I., Bogner, W., Wolzt, M., Carlier, P., Trattinig, S., Moser, E., & Meyerspeer, M. (2020). Interleaved ³¹P MRS/¹H ASL for analysis of metabolic and functional heterogeneity along human lower leg muscles at 7T. *Magnetic Resonance in Medicine*, 83(6), 1909–1919. <https://doi.org/10.1002/mrm.28088>
- Ovens, A. J., Scott, J. W., Langendorf, C. G., Kemp, B. E., Oakhill, J. S., & Smiles, W. J. (2021). Post-translational modifications of the energy guardian AMP-activated protein kinase. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(3), 1229. <https://doi.org/10.3390/ijms22031229>
- Özbay, S., Ulupınar, S., Gençoğlu, C., Ouergui, I., Öget, F., Yılmaz, H. H., Kishali, N. F., Kıyıcı, F., Asan, S., Uçan, İ., & Ardigò, L. P. (2024). Effects of Ramadan intermittent fasting on performance, physiological responses, and bioenergetic pathway contributions during repeated sprint exercise. *Frontiers in nutrition*, 11. <https://doi.org/10.3389/fnut.2024.1322128>
- Padulo, J., Buglione, A., Larion, A., Esposito, F., Doria, C., Čular, D., di Prampero, P. E., & Peyré-Tartaruga, L. A. (2023). Energy cost differences between marathon runners and soccer players: Constant versus shuttle running. *Frontiers in physiology*, 14. <https://doi.org/10.3389/fphys.2023.1159228>
- Pampero, D. (1981). Energetics of muscular exercise. *Rev Physiol Biochem Pharmacol*, 89, 143–222.
- Panissa, V. L. G., Fukuda, D. H., Caldeira, R. S., Gerosa-Neto, J., Lira, F. S., Zagatto, A. M., & Franchini, E. (2018). Is oxygen uptake measurement enough to estimate energy expenditure during high-intensity intermittent exercise? Quantification of anaerobic contribution by different methods. *Frontiers in physiology*, 9. <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.00868>
- Papadopoloulos, S., Jürgens, K. D., & Gros, G. (2000). Difusión de proteínas en fibras musculares esqueléticas vivas: dependencia del tamaño de la proteína, tipo de fibra y contracción. *Biophys J*, 79(4), 2084–2094.
- Parolin, M. L., Chesley, A., Matsos, M. P., Spriet, L. L., Jones, N. L., & Heigenhauser, G. J. (1999). Regulation of skeletal muscle glycogen phosphorylase and PDH during maximal intermittent exercise. *Am J Physiol*, 277, E890-900.
- Perry, C. G. R., Lally, J., Holloway, G. P., Heigenhauser, G. J. F., Bonen, A., & Spriet, L. L. (2010). Repeated transient mRNA bursts precede increases in transcriptional and mitochondrial proteins during training in human skeletal muscle: Molecular responses during mitochondrial biogenesis. *The Journal of Physiology*, 588(23), 4795–4810. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2010.199448>
- Pranoto, A., Rejeki, P. S., Miftahussurur, M., Yosika, G. F., Ihsan, M., Herawati, L., Rahmanto, I., & Halim, S. (2023). Aerobic exercise increases release of growth hormone in the blood circulation in obese women. *Retos digital*, 51, 726–731. <https://doi.org/10.47197/retos.v51.99944>
- Price, M., Beckford, C., Dorricott, A., Hill, C., Kershaw, M., Singh, M., & Thornton, I. (2014). Oxygen uptake during upper body and lower body Wingate anaerobic tests. *Applied Physiology Nutrition and Metabolism*, 39(12), 1345–1351. <https://doi.org/10.1139/apnm-2013-0405>
- Robergs, R., O'Malley, B., Torrens, S., & Siegler, J. (2024). The missing hydrogen ion, part-2: Where the evidence leads to. *Sports Medicine and Health Science*, 6(1), 94–100. <https://doi.org/10.1016/j.smhs.2024.01.001>
- Saibene, F., & Minetti, A. E. (2003). Biomechanical and physiological aspects of legged locomotion in humans. *European Journal of Applied Physiology*, 88(4), 297–316. <https://doi.org/10.1007/s00421-002-0654-9>
- Saks, V. A., & Ventura-Clapier, R. (1994). Bioenergética celular: papel de las creatina quinasas acopladas. Kluwer Academic Publishers.
- Scott, C. (2014). Combustion, respiration and intermittent exercise: A theoretical perspective on oxygen uptake and energy expenditure. *Biology*, 3(2), 255–263. <https://doi.org/10.3390/biology3020255>
- Scott, C. B. (1997). Interpreting energy expenditure for anaerobic exercise and recovery: an anaerobic hypothesis. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 37(1), 18–23.
- Seemann-Sinn, A., Rüdrieh, P., Gorges, T., Naundorf, F., & Wolfarth, B. (2023). Physiological and energetic demands during still-rings routines of elite artistic gymnasts. *International journal of sports physiology and*

- performance, 18(7), 704–710. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2022-0380>
- Sergeeva, X. V., Lvova, I. D., & Sharlo, K. A. (2024). Disuse-induced muscle fatigue: Facts and assumptions. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(9), 4984. <https://doi.org/10.3390/ijms25094984>
- Soydan, T. A., Hazir, T., Ozkan, A., & Kin-Isler, A. (2018a). Gender differences in repeated sprint ability. *Isokinetics and exercise science*, 26(1), 73–80. <https://doi.org/10.3233/ies-180171191>
- Soydan, T. A., Hazir, T., Ozkan, A., & Kin-Isler, A. (2018b). Gender differences in repeated sprint ability. *Isokinetics and exercise science*, 26(1), 73–80. <https://doi.org/10.3233/ies-180171191>
- Spriet, L. L. (1992). Anaerobic metabolism in human skeletal muscle during short-term, intense activity. *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology*, 70(1), 157–165. <https://doi.org/10.1139/y92-023>
- Sweeney, H. L. (1994). La importancia de la reacción de la creatina quinasa: el concepto de capacidad metabólica. *Medicina y ciencia en deportes y ejercicio*. Enero de, 26(1), 30–36.
- Tokarska-Schlattner, M., Zeaiter, N., Cunin, V., Attia, S., Meunier, C., Kay, L., Achouri, A., Hiriart-Bryant, E., Couturier, K., Tellier, C., El Harras, A., Elena-Herrmann, B., Khochbin, S., Le Gouellec, A., & Schlattner, U. (2023). Multi-method quantification of acetyl-coenzyme A and further acyl-coenzyme A species in normal and ischemic rat liver. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(19), 14957. <https://doi.org/10.3390/ijms241914957>
- Tortu, E., Ouergui, I., Ulupinar, S., Özbay, S., Gençoğlu, C., & Ardigò, L. P. (2024). The contribution of energy systems during 30-second lower body Wingate anaerobic test in combat sports athletes: Intermittent versus single forms and gender comparison. *PloS One*, 19(5), e0303888. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0303888>
- Toti, L., Bartalucci, A., Ferrucci, M., Fulceri, F., Lazzeri, G., Lenzi, P., Soldani, P., La Torre, A., & Gesi, M. (2013a). High-intensity exercise training induces morphological and biochemical changes in skeletal muscles. *Biology of sport*, 30(4), 301–309. <https://doi.org/10.5604/20831862.1077557>
- Toti, L., Bartalucci, A., Ferrucci, M., Fulceri, F., Lazzeri, G., Lenzi, P., Soldani, P., La Torre, A., & Gesi, M. (2013b). High-intensity exercise training induces morphological and biochemical changes in skeletal muscles. *Biology of sport*, 30(4), 301–309. <https://doi.org/10.5604/20831862.1077557>
- Ulupinar, S., & Özbay, S. (2022). Energy pathway contributions during 60-second upper-body Wingate test in Greco-Roman wrestlers: intermittent versus single forms. *Research in Sports Medicine*, 30(3), 244–255. <https://doi.org/10.1080/15438627.2021.1895784>
- Ulupinar, S., Özbay, S., Gençoğlu, C., Franchini, E., Kishali, N. F., & İnce, İ. (2021). Effects of sprint distance and repetition number on energy system contributions in soccer players. *Journal of Exercise Science and Fitness*, 19(3), 182–188. <https://doi.org/10.1016/j.jesf.2021.03.003>
- van Loon, L. J. C., Greenhaff, P. L., Constantin-Teodosiu, D., Saris, W. H. M., & Wagenmakers, A. J. M. (2001). The effects of increasing exercise intensity on muscle fuel utilisation in humans. *The Journal of Physiology*, 536(1), 295–304. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7793.2001.00295.x>
- Van Someren, K. (2006). *La fisiología del entrenamiento anaeróbico* (G. Whyte, Ed.). Elsevier.
- Vara-Ciruelos, D., Russell, F. M., & Hardie, D. G. (2019). The strange case of AMPK and cancer: Dr Jekyll or Mr Hyde? *Open Biology*, 9(7). <https://doi.org/10.1098/rsob.190099>
- Verzijl, H. T. F. M., van Engelen, B. G. M., Luyten, J. A. F. M., Steenbergen, G. C. H., van den Heuvel, L. P. W. J., ter Laak, H. J., Padberg, G. W., & Wevers, R. A. (1998). Genetic characteristics of myoadenylate deaminase deficiency. *Annals of Neurology*, 44(1), 140–143. <https://doi.org/10.1002/ana.410440124>
- Wallimann, T., Wyss, M., Brdiczka, D., Nicolay, K., & Eppenberger, H. M. (1992). Compartimentación intracelular, estructura y función de las isoenzimas de la creatina quinasa en tejidos con demandas energéticas altas y fluctuantes: el «circuito de la fosfocreatina» para la homeostasis energética celular. *Biochem J*, 281, 21–40.
- Yan, Y., Zhou, X. E., Xu, H. E., & Melcher, K. (2018). Structure and physiological regulation of AMPK. *International Journal of Molecular Sciences*, 19(11), 3534. <https://doi.org/10.3390/ijms19113534>
- Zagatto, A., Redkva, P., Loures, J., Filho, C. K., Franco, V., Kaminagakura, E., & Papoti, M. (2011). Anaerobic contribution during maximal anaerobic running test: correlation with maximal accumulated oxygen deficit. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 21(6). <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2010.01258.x>
- Zheng, T., Yang, X., Wu, D., Xing, S., Bian, F., Li, W., Chi, J., Bai, X., Wu, G., Chen, X., Zhang, Y., & Jin, S. (2015). Salidroside ameliorates insulin resistance through activation of a mitochondria-associated AMPK/PI3K/Akt/GSK3 β pathway. *British Journal of Pharmacology*, 172(13), 3284–3301. <https://doi.org/10.1111/bph.13120>

Datos de los/as autores/as:

Mauricio Ernesto Tauda

Eduardo Cruzat Bravo

Harry Castro Núñez

David Ergas Schleef

mauro.tauda@gmail.com

ecruzat@santotomas.cl

harrycastronu@santotomas.cl

dergas@santotomas.cl

Autor/a

Autor/a

Autor/a

Autor/a