

Exceptional oxygen consumption, values and relationships: An analysis from Exercise Physiology

Consumos de oxígeno excepcionales, valores y relaciones: Un análisis desde la Fisiología del Ejercicio

Cristian Cofré-Bolados^{1*}, Félix Vidal Diaz², Tomás Herrera-Valenzuela¹, Claudio Farias-Valenzuela³, Alexis Espinoza-Salinas⁴, Dilan Galeano-Rojas⁵

¹ Escuela de Ciencias de la Actividad Física, el Deporte y la Salud, Facultad de Ciencias Médicas, Universidad de Santiago de Chile (USACH), Chile.

² Escuela de Educación, Magister en Evaluación y Planificación del Entrenamiento Deportivo, Universidad Viña del Mar, Chile.

³ Escuela de Ciencias de la Actividad Física, Universidad de Las Américas, Santiago 9170022, Chile.

⁴ Escuela de Kinesiología, Universidad Santo Tomas, Santiago, Chile.

⁵ Facultad de Ciencias de la Educación, Universidad de Granada, España.

* Correspondence: Cristian Cofré-Bolados: cristian.cofre@usach.cl

ABSTRACT

Maximum oxygen consumption VO_{2max} has represented a fundamental reference when measuring cardiorespiratory fitness in different sports. The aim of this study was to present the results of ergometry tests with gas analysis in athletes who exceeded 70 ml/kg/min in VO_{2max} , analyzing the correlations between VO_{2max} and metabolic, cardiovascular, and respiratory parameters. The study was of a descriptive correlational type, and 27 male athletes participated. The r Pearson test was applied to determine the correlation between the variables. In the result analysis, correlations were determined: small between Age and VO_{2max} ($r = -0.238$; $p = 0.24$); large between VO_{2max} vs VO_{2VT1} ($r = 0.741$; $p < 0.001$); VO_{2max} vs VO_{2VT2} ($r = 0.808$; $p < 0.001$); and VO_{2VT1} vs VO_{2VT2} ($r = 0.783$; $p < 0.001$). Mean between VO_{2max} and HR ($r = 0.340$; $p = 0.09$); large between absolute VO_{2max} and $VO_{2/HRmax}$ ($r = 0.840$; $p < 0.001$); small between VO_{2max} and VE ($r = 0.214$; $p = 0.30$); small between VO_{2max} and BR (-0.184 ; $p = 0.37$); small between VE and RR% ($r = -0.281$; $p = 0.164$). There were large correlations between VO_{2max} and ventilatory thresholds, and there was also a large

correlation between absolute VO₂max and oxygen pulse, with small and non-existent correlations between VO₂max and ventilatory parameters.

KEYWORDS

Cardiorespiratory Fitness; Maximum Ventilation; Maximum Oxygen Pulse

RESUMEN

El consumo máximo de oxígeno (VO₂max) ha representado una referencia fundamental a la hora de medir el fitness cardiorrespiratorio en deportes. El objetivo de este trabajo fue presentar resultados de pruebas de ergometría con análisis de gases en deportistas que superaron los 70 ml/kg/min en VO₂max, se analizaron las correlaciones entre el VO₂max y parámetros metabólicos, cardiovasculares y respiratorios. El estudio fue descriptivo correlacional, y participaron 27 deportistas masculinos. Se aplicó la prueba de *r* Pearson para determinar la correlación entre las variables. En el análisis de resultado se determinaron correlaciones: pequeña entre Edad y VO₂max ($r = -0,238$; $p = 0,24$); grande entre VO₂max vs VO₂ VT1 ($r = 0,741$; $p < 0,001$); VO₂max vs VO₂ VT2 ($r = 0,808$; $p < 0,001$); y VO₂ VT1 vs VO₂ VT2 ($r = 0,783$; $p < 0,001$). Media entre VO₂max y FC ($r = 0,340$; $p = 0,09$); grande entre VO₂max absoluto y VO₂/FCmax ($r = 0,840$; $p < 0,001$); pequeña entre VO₂max y VE ($r = 0,214$; $p = 0,30$); pequeña entre VO₂max y FR ($r = -0,184$; $p = 0,37$); pequeña entre VE y RR% ($r = -0,281$; $p = 0,164$). Se presentaron correlaciones grandes entre el VO₂max y umbrales ventilatorios, también existió correlación grande entre el VO₂max absoluto y el pulso de oxígeno, con correlaciones pequeñas e inexistentes entre el VO₂max y los parámetros ventilatorios.

PALABRAS CLAVE

Fitness Cardiorrespiratorio; Ventilación Máxima; Pulso de Oxígeno Máximo

1. INTRODUCCIÓN

El consumo máximo de oxígeno (VO₂max) ha representado una referencia fundamental a la hora de medir el fitness cardiorrespiratorio en diferentes actividades físicas y deportivas, el estudio más detallado de la fisiología del esfuerzo nos ha permitido entender que existen otros parámetros máximos y sub-máximos de alto interés, incluso algunos de estos con mayor relación con el resultado en pruebas deportivas, tal como lo señaló Sjodin & Svedenhag en un clásico estudio (Sjodin & Svedenhag, 1985) donde se expone una mayor relación de la velocidad de segundo umbral ventilatorio (VT2), por sobre el VO₂max alcanzado con el rendimiento en la maratón, sin dejar de mencionar que,

la relación entre $VO_2\text{max}$ y tiempo en los 42 kilómetros es relevante. En el año 2012, el ciclista noruego Oskar Svendsen con 18 años registró una marca de $VO_2\text{max}$ de 96,7 ml/kg/min en un laboratorio en Lillehammer (Noruega). Este caso fue analizado de manera científica a través de un estudio (Rønnestad et al., 2019), dando veracidad y sustento a este registro. Antes que Svendsen debutara en el ciclismo a la edad de 15 años, era un esquiador alpino novel, su entrenamiento no era particularmente intenso: uno o dos entrenamientos a la semana, junto con las competencias de fin de semana durante el invierno. Su trabajo estaba enfocado, en fuerza, core y coordinación; razón por la cual no se esperaría que tuviera una potencia aeróbica particularmente buena. Oskar a los 15 años, comenzó a pedalear dos o tres veces por semana como parte de su entrenamiento fuera de temporada. Era bueno en ello, así que tomó una prueba de $VO_2\text{max}$ como parte de un proceso de selección para un programa de ciclismo en una escuela local. El resultado de 74,6 ml/kg/min para un adolescente poco entrenado era excepcional, algo que se esperaba de un atleta de resistencia de talla nacional, e incluso internacional. Fue así como aprobó el proceso de selección. Svendsen comenzó a entrenar formalmente y sus resultados se expresaron en mejoras fisiológicas y de rendimiento. Tan solo seis meses después de su primer test, alcanzó una medida de 83,4 ml/kg/min. Al año siguiente, logró llegar a 86,8 ml/kg/min. Y un año después de eso, fue cuando registró el conocido 96,7 ml/kg/min. Su segunda lectura más alta durante el mismo año 2012 fue de 92,8 ml/kg/min.

El $VO_2\text{max}$ se expresa de forma relativa al peso corporal, lo cual significa que es una medida que se divide por el peso en kilogramos, aunque, lo que mide realmente el carro metabólico es el $VO_2\text{max}$ absoluto, el cual no está dividido por el peso corporal. El registro de este ciclista corresponde a una lectura de $VO_2\text{max}$ absoluto de 7.397 litros de oxígeno por minuto; la prueba posterior que se le realizó fuera de temporada fue prácticamente indistinguible, con un resultado de 7.31 L/min. Svendsen todavía era la mejor máquina para procesar oxígeno; lo único que había sucedido era que ganó unos cuantos kilogramos durante su temporada de descanso. Algunas semanas después del registro histórico ganó la contra reloj del campeonato europeo junior de ciclismo. Al año siguiente, se incorporó al ranking de los sub-23 con un equipo noruego llamado Joker. Tuvo unas competencias prometedoras, así como otras decepcionantes. En 2014, dos años después de su famoso test, decidió tomar una pausa del ciclismo, y después de 15 meses sin entrenamiento formal, durante los cuales corrió una o dos veces por semana, realizó una última visita al laboratorio. Su $VO_2\text{max}$ había regresado a 77.0 ml/kg/min, sorprendentemente cerca de los 74.6 que había registrado la primera vez que llegó al laboratorio con 15 años.

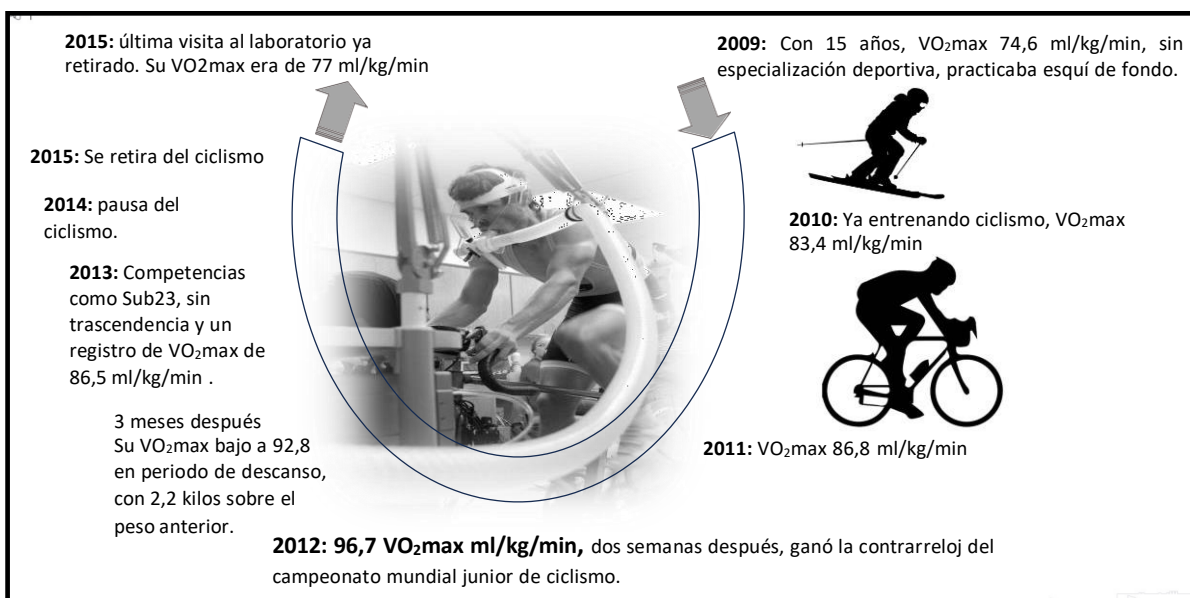


Figura 1. Esquema de la evolución y reducción del VO₂max del ciclista Noruego Oskar Svendsen, tomado de Rønnestad (Rønnestad et al., 2019)

Una de las explicaciones de porque Svendsen no logró ser un ciclista adulto destacado, se podría asociar con la explicación expresada en una investigación realizada sobre Maratonistas de clase mundial, donde revelan que los mejores corredores del mundo deben conseguir un "equilibrio perfecto" sobre tres factores: 1) Un alto VO₂max (tasa de suministro de oxígeno a los músculos que trabajan); 2) Excelente economía mecánica (eficiencia muscular); 3) Un segundo umbral de lactato elevado (intensidad porcentual de segundo umbral) (Jones et al., 2021).

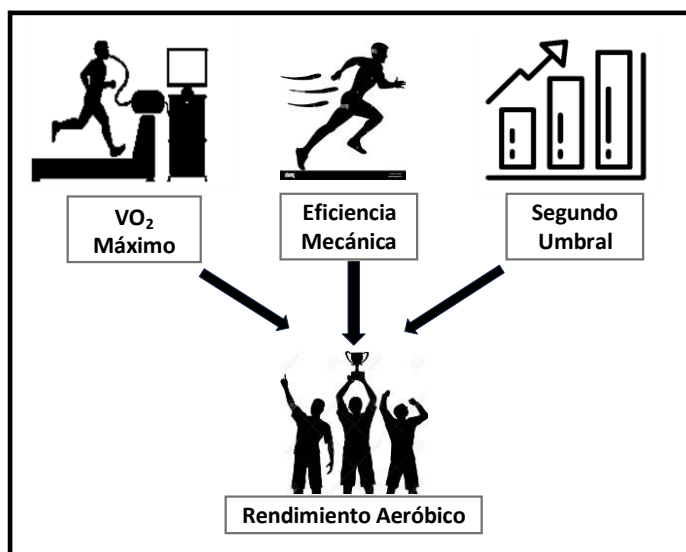


Figura 2. Condicionantes del rendimiento aeróbico en competencias de resistencia aeróbica o endurance

Para correr un maratón en un tiempo de alrededor de 2 horas (21 Km/h o 2 min 48 seg por Km en promedio) como lo han hecho Kelvin Kiptum y Eliud Kipchoge, se requiere un VO_2 aproximado a los 4.0 litros, para un corredor de 59 kg, el valor relativo de VO_2 sería de 68,2 ml/kg/min; cercano a un gasto de oxígeno de 191 ml/kg por kilómetro. Si pensamos que es un atleta muy entrenado puede presentar el VT2 a 90% del máximo, se esperaría un $\text{VO}_{2\text{max}}$ de 75,8 ml/kg/min como mínimo en este atleta, pero ya sabemos que existen otras variables intervinientes. La intensidad de VT2 se representa en porcentaje del máximo consumo de O_2 y la eficiencia muscular está expresada por el gasto energético y la velocidad alcanzada con un determinado VO_2 . Con respecto esta última variable una mayor eficiencia muscular o economía mecánica disminuye el valor de VO_2 requerido para sostener un trabajo mecánico determinado, ya sea una velocidad de carrera o una determinada potencia. Investigaciones previas han demostrado la importancia de la eficiencia muscular en el rendimiento de pruebas de fondo (Suchomel et al., 2016). El rendimiento superior de los corredores Keniatas y Eritreos en comparación con sus homólogos Europeos es atribuible en mayor medida a una economía de carrera eficiente (Lucia et al., 2006). El $\text{VO}_{2\text{max}}$ no parece diferir entre europeos y africanos, valores de 70 ml/kg/min se encuentran en corredores de resistencia aeróbica masculinos de clase mundial, sin embargo, cuando estos valores son levemente “bajos” pueden compensarse con una gran economía de carrera (Bozzini et al., 2020; Paavolainen et al., 1999). Algo muy interesante, es que tanto, corredores de maratón como ciclistas, altamente entrenados de clase mundial presentan una relación inversa entre el $\text{VO}_{2\text{max}}$ y la economía mecánica (Lucia et al., 2002; Støren, 2009). Aunque, los valores altos de $\text{VO}_{2\text{max}}$ (5,0 a 5,5 litros/min o 70 a 75 ml/kg/min) se encuentran de manera general en deportistas de resistencia aeróbica de clase mundial, no es el determinante único del rendimiento en este deporte (Moses & Hackney, 2017). Por ejemplo, ciclistas aficionados y bien entrenados muestran valores de $\text{VO}_{2\text{max}}$ similares a los de los ciclistas profesionales, siempre que se alcance un nivel mínimo de $\text{VO}_{2\text{max}}$ (estimado en 65 ml/kg/min), la economía del ciclismo y la eficiencia mecánica bruta serían especialmente importantes en el rendimiento de alto nivel, hecho que permite entender mejor la historia del ciclista Oskar Svendsen.

En relación a lo anterior, es imposible no hacer referencia a los deportes de invierno y particularmente el esquí de fondo, primero porque la mayor cantidad de masa muscular involucrada favorece el registro final de $\text{VO}_{2\text{max}}$, y los esquiadores de fondo implican mayor cantidad de musculatura en comparación con otras pruebas de resistencia aeróbica, en este caso además de piernas y brazos se involucra la musculatura del tronco, lo que implica que a mayor musculatura, más utilización de oxígeno en la masa muscular activa, y por lo tanto mayor $\text{VO}_{2\text{max}}$ (Tucker et al., 2009);

y en segundo término, porque todos los registros y análisis de atletas con altos VO_2max incorporan entre sus exponentes principales a esquiadores de fondo, en suma a lo anterior, existen registros de varios esquiadores que han superado los 90 ml/kg/min, por ejemplo, en un interesante estudio, se encontraron diferencias significativas en el consumo de oxígeno entre competidores que ganaban medallas vs los que no ganaban medallas, en los juegos olímpicos de invierno, siendo este un VO_2max absoluto $6,17 \pm 0,57$ y VO_2max relativo de $81,1 \pm 3,3$ en hombres con medalla vs $6,17 \pm 0,46$ y $78,5 \pm 4,5$ respectivamente en los que no ganaban medalla. En cuanto a las mujeres sus valores fueron VO_2max absoluto $3,99 \pm 0,21$ y VO_2max relativo $65,9 \pm 4,9$, en ganadoras de medallas vs $3,96 \pm 0,39$ y $62,0 \pm 3,1$ en las que no ganaban medallas (Tønnessen et al., 2015). Es decir, el VO_2max como predictor de medallas olímpicas.

Existen deportes donde el VO_2max es un factor limitante del rendimiento, pero no determinante, es decir, se requiere un VO_2max de base, como es el caso de deportes equipo, por ejemplo el Fútbol, donde la literatura plantea la necesidad de un VO_2max superior a 55ml/kg/min (Salazar Martínez & Jiménez Trujillo, 2018), nuestro grupo investigación ha registrado en laboratorio valores superiores a los 70 ml/kg/min en algunos casos de futbolistas jóvenes, valores que se ven posteriormente disminuidos en favor de una mayor eficiencia mecánica en futbolistas profesionales (Segales et al., 2023), replicando esta idea de una relación inversa entre VO_2max y eficiencia mecánica. Nos ha llamado la atención que los jugadores juveniles en los cuartiles más altos de VO_2max suelen estar en los grupos que alcanzan el objetivo de integrarse al futbol profesional, en desmedro de aquellos que presentaron bajos rendimientos en VO_2max .

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos en pruebas de ergometría con análisis de gases en deportistas, tomando como principal parámetro de análisis y selección de la muestra, el valor final de VO_2max , además se analizan otros parámetros vinculados a la ventilación y el gasto cardiaco en esfuerzo máximo, junto con las relaciones que se pueden obtener de estos datos propios de la prueba de esfuerzo en deportistas varones, evaluados en nuestro laboratorio, bajo el único criterio de inclusión “superar un valor de VO_2max de 70 ml/kg/min” con el fin de presentar valores de referencia no habituales que pueden ser considerados como excepcionales para esta prueba a la luz de las referencias entregadas por la literatura científica especializada.

2. MÉTODOS

2.1. Diseño

Estudio de casos, con diseño descriptivo, correlacional transversal, donde se realizan análisis de correlación sobre principales parámetros señalados como de interés para el estudio.

2.2. Participantes

Corresponde a 27 deportistas Chilenos, todos de sexo masculino, quienes presentaron VO₂max catalogado como excepcionales (sobre 70ml/kg/min), seleccionados por acumulación. A continuación se presentan en tablas los detalles de las características del grupo. Tabla 1: Las disciplinas deportivas incorporadas, número de atletas por disciplina, nivel competitivo y edad promedio en los casos de dos o más deportistas. Tabla 2: El análisis descriptivo de la muestra.

Tabla 1. Análisis descriptivos de la muestra

Deporte	Número	Nivel	Edad promedio
Ciclismo de ruta	1	Internacional	20
Ciclismo MTB	1	Suramericano	23
Futbol	10	Profesional /Nacional	19
Maratón	2	Nacional	34,5
Maratón y Trail Running.	4	Suramericano	30,8
Trail Running	1	Internacional	29
Triatlón	2	Nacional	32,5
Orientación Militar	4	Suramericano	29,3
Ultramaraton	2	Nacional	21
Total	27		

Nota: MTB: Mountain bike.

Tabla 2. Análisis descriptivos de la muestra

Características de la muestra	Válido	Media	DE	Mínimo	Máximo
Edad (años)	27	25	7,47	16	44
Peso corporal (kg)	27	65,3	6,8	49	80
Talla (cm)	27	165,7	33,4	1,70	192
IMC (Peso/Talla ²)	27	21,89	1,6	17	25

Nota: IMC: índice de masa corporal; DE: desviación estándar

2.3. Procedimientos

Se realizaron aproximadamente 150 ergometrías con análisis de gases, entre el 02 de enero de 2022 y el 02 de abril de 2023, a deportistas de diferentes disciplinas deportivas, en el laboratorio de Fisiología del Ejercicio de la Universidad de Santiago de Chile (USACH). Se utilizó un analizador de gases Cortes 3B Metalizer (Leipzig Alemania) y una cinta motorizada marca Technogym (made in Italia) modelo Excite para los protocolos de carrera. Para los protocolos en cicloergómetro se utilizó un rodillo Flux S más Garmin Edge530 para la visualización de datos. El protocolo utilizado en cinta rodante correspondió a una adaptación del protocolo propuesto por el Colegio Americano de medicina del Deporte (ACSM – siglas en inglés) con 6 minutos de activación inicial a 11 km/h, dos minutos de recuperación y el inicio del protocolo incremental a 8 km/h, con incremento de la velocidad cada minuto en 1 km/h, manteniendo durante toda la prueba 1,5% de pendiente. La prueba se da por finalizada cuando el sujeto alcanza los criterios de maximalidad de meseta de $VO_2\max$, $FC\max$ estable, y cociente respiratorio de 1,15 o en su defecto cuando el atleta no pudo terminar la etapa de 1 minuto. Para el caso del uso de rodillo y bicicleta del atleta, se inició a 90 vatios con incremento de 30 vatios cada minuto. De todas las pruebas realizadas se seleccionó a los atletas que hubieran superado los 70 ml/kg/min independiente de la disciplina deportiva practicada. Durante el desarrollo de la prueba los deportistas eran informados de los resultados alcanzados y se controlaban los parámetros y condiciones de seguridad del atleta.

2.4. Variables del estudio

2.4.1. Consumo máximo de oxígeno

El $VO_2\max$ es la cantidad máxima de oxígeno que una persona puede ingresar, transportar y metabolizar; el valor no cambia a pesar de un aumento en la carga de trabajo. El $VO_2\max$ se expresa en L/min como valor absoluto o en ml/kg/min como $VO_2\max$ relativo (Buttar et al., 2019)

Los atletas de diferentes disciplinas deportivas presentan un amplio rango de $VO_2\max$, por lo que, para mejores comparaciones interindividuales, es mejor expresarlo como valor porcentual predicho o en mililitros de oxígeno por kilogramo de peso corporal por minuto (Guazzi et al., 2012).

2.4.2. Consumo de oxígeno en VT1 (VO_2 VT1)

Consistente en la determinación del punto de VT1 y luego identificación del VO_2 alcanzado en ese momento (Cofre et al., 2022). El umbral ventilatorio uno VT1, se define como la intensidad del

ejercicio a la cual el aumento de la ventilación se vuelve desproporcionado con el aumento de la producción de potencia o la velocidad de locomoción durante una prueba de ejercicio incremental. Varios científicos han observado un aumento no lineal en la ventilación cuando se excede la intensidad del ejercicio asociada con el umbral anaeróbico bajo la terminología de Wasserman (Sietsema et al., 2020). Esta observación ha llevado al intento de utilizar la ventilación para detectar el VT1, y se han informado varias técnicas específicas. Estas incluyen aumentos no lineales en la ventilación y la producción de CO₂, y un aumento en la relación de intercambio de gases respiratorios.

2.4.3. Consumo de oxígeno en VT2 (VO₂ VT2)

A medida que aumenta la intensidad del ejercicio por encima del VT1, aumenta la tasa de producción de lactato y se llega a un punto en el que el bicarbonato ya no puede contrarrestar la acidosis metabólica inducida por el ejercicio. En la región de amortiguación isocápnic, (donde el bicarbonato disminuye sin que se observe hiperventilación excesiva). A continuación, se produce un aumento exponencial de la concentración de lactato en sangre y un exceso de CO₂, mientras que el aumento del VO₂ sigue siendo lineal. El segundo punto de inflexión en la respuesta de la ventilación al ejercicio es cuando los quimiorreceptores periféricos provocan hiperventilación, que se identifica como el segundo VT o punto con compensación respiratoria (RCP) (Galán-Rioja, 2020; Mezzani, 2017). Generalmente se alcanza alrededor del 70-80% del VO₂max o del 80-90% de la frecuencia cardíaca máxima durante el ejercicio incremental (Mezzani, 2017; Mezzani et al., 2013). El VT2 o RCP se puede expresar como VO₂ (ml/kg/min) o porcentaje del VO₂max. La carga de trabajo relacionada con el RCP (km/h o watts) también podría proporcionar una escala para comparar la capacidad de diferentes atletas para cumplir con intensidades más altas de ejercicio. Por lo tanto, la potencia aeróbica es un parámetro esencial en el rendimiento de los atletas, especialmente aquellos que practican deportes que requieren alta intensidad aeróbica (Opondo et al., 2015).

2.4.4. Frecuencia cardíaca máxima (FCmax.)

La frecuencia cardíaca (FC) es un parámetro que se mide de manera regular y que se utiliza a menudo en la práctica clínica, los deportes y la investigación científica; es fácil de medir de forma fiable con muy poco equipo (Robergs & Landwehr, 2002). La FC aumenta de forma lineal con el aumento del esfuerzo físico, hasta que el individuo alcanza un máximo de la reserva cronotrópica (FCmax), con la carga de trabajo máxima (Kostis et al., 1982). La FCmax es útil para prescribir niveles de esfuerzo en el entrenamiento deportivo y ejercicio para la salud; También se utiliza como criterio

de maximalidad para realizar pruebas de esfuerzo con electrocardiograma (ECG) o ecocardiografía (Robergs & Landwehr, 2002).

2.4.5. Pulso de oxígeno máximo (VO_2/FC max)

Durante el ejercicio incremental, el pulso de oxígeno representa el aumento del volumen sistólico necesario para aumentar el esfuerzo y alcanza sus valores máximos junto con el máximo VO_2 . Cuando este parámetro no aumenta o incluso disminuye con el esfuerzo incremental, indica una respuesta anormal del volumen sistólico y luego en el caso de deportistas presenta un constante incremento llegando a valores superiores a 20 o incluso 25 ml/latido, su parámetro de medición (Laukkanen et al., 2018). El pulso de oxígeno se representa por la relación entre el VO_2 en ml/min y la FC en latidos/min, expresada como ml/latido (Myers et al., 2015). Según la ecuación de Fick, $VO_2 = (FC \times VS) \times D(a-v)O_2$, donde VS es el volumen sistólico. Por lo tanto, el pulso de O_2 proporciona una estimación del volumen sistólico y la respuesta de perfusión/extracción vascular periférica al ejercicio (Balady et al., 2010). Los valores normales en reposo varían de 4 a 6 ml/latido y aumentan hasta 10 a 20 ml/latido en el ejercicio máximo (Myers et al., 2015). Los atletas demuestran un aumento del 10% al 15% en el tamaño de la cavidad ventricular y un llenado cardíaco mejorado en diástole que aumenta su volumen sistólico (VS) en comparación con individuos de edad y tamaño similares, incrementando sus VO_2/FC (La Gerche et al., 2012; Sharma et al., 2015)

2.4.6. Frecuencia respiratoria máxima (FRmax)

La frecuencia respiratoria (FR) juega un papel importante durante el ejercicio como un fuerte marcador de esfuerzo físico, más que otras variables fisiológicas monitoreadas tradicionalmente. El aumento no lineal de FR durante el ejercicio incremental es paralelo a la conocida evolución temporal del lactato sanguíneo (La^-), similar al cambio en el esfuerzo físico y la dificultad de la tarea experimentados en intensidades de ejercicio superiores al primer umbral ventilatorio. De hecho, la FR refleja mejor el esfuerzo físico que La^- cuando se realiza una prueba incremental después de un daño muscular inducido por el ejercicio (Davies et al., 2011) o una depleción de glucógeno (Busse et al., 1991).

2.4.7. Reserva respiratoria (RR%)

En inglés Breathing reserve (BR), corresponde a la relación entre la máxima ventilación voluntaria (MVV) y la máxima ventilación en ejercicio durante 1 minuto, expresada en tanto por cien.

Según incrementa el esfuerzo, la máxima ventilación en ejercicio va aumentando y se aproxima al valor de la máxima ventilación voluntaria. En situaciones fisiológicas, durante el esfuerzo, el porcentaje de la diferencia entre MVV y la ventilación en ejercicio, no debe ser inferior al 20%. Existen dos excepciones a los valores de referencia, que corresponde a patrones restrictivos u obstructivos quienes presentan reducción de la RR; La otra excepción corresponde a atletas entrenados quienes suelen presentar valores inferiores a 20% incluso llegando a 0 debido a la preparación muscular y a la gran capacidad anaeróbica que se consigue con el entrenamiento. En los atletas y personas entrenadas, la disminución de la RR% se produce al final de a ergometría con análisis de gases asociada a un gran consumo de oxígeno y pulso de oxígeno elevado por encima de los valores normales.

2.5. Análisis estadístico

Para el análisis estadístico se creó una base de datos, y la información se examinó en el programa software Jasp®, se determinó normalidad de los registros y se aplicó, la prueba de r Pearson en base a las características de los datos, para determinar la correlación entre las variables clasificadas y analizadas. El valor de $p \leq 0.05$ se consideró estadísticamente significativo. Y la interpretación del coeficiente de correlación se ajustó a los siguientes parámetros de referencia: <0.01 Irrelevante; 0.1 a 0.29 Pequeña, 0.3 a 0.49 Media y $>0,5$ Grande (Goss-Sampson & Meneses, 2019). La investigación se ejecutó con aprobación del Comité de ética local y se respetaron las normas del Helsinki para estudios en seres humanos.

3. RESULTADOS

A continuación se describen los resultados obtenidos en una serie de variables cardiopulmonares y metabólicas obtenidas de la ergometría con análisis de gases realizada a cada deportista participante.

Tabla 3. Estadísticos Descriptivos

	Válido	Media	DE	Mínimo	Máximo
VO₂max (ml/kg/min)	27	73	3,0	70	84
VO₂max L. (L/min)	27	4,72	0,51	3,63	5,80
FCmax. (latidos/min)	27	187,4	7,5	170	204
VO₂/FC max (ml/latidos)	27	25,6	2,6	21	31
RER (cociente)	27	1,14	0,04	1,06	1,22
VEmax (L/min)	27	152,7	21,3	115	201
FRmax (ciclos/min)	27	55,9	7,0	46	70
RR% (BR)(%)	27	7,6	3,4	0	16,4

FEO₂ max (%)	27	16,9	0,3	16	17,5
% VT1	27	65,1	3,3	60	73
VO₂ VT1 (ml/kg/min)	27	47,3	3,5	42	57
FC VT1 (latidos/min)	27	157	7,7	141	172
% VT2	27	84,6	2,8	80	92
VO₂ VT2 (ml/kg/min)	27	61,6	3,7	57	71
FC VT2 (latidos/min)	27	176,7	7,0	164	192

Nota: VO₂max: consumo de oxígeno máximo relativo (mililitros/ kilogramos por minuto); VO₂max L.: Consumo de oxígeno máximo absoluto (Litros minuto); FCmax: Mayor número de latidos cardiacos por minuto (latidos en un minuto); VO₂/FC máximo: Pulso de oxígeno máximo alcanzado (Consumo de oxígeno absoluto en mililitros/latidos cardiacos); RER: Cociente respiratoria, cociente de la relación entre volumen de dióxido de carbono y volumen de oxígeno (VCO₂/VO₂); VEmax: Mayor cantidad de aire ventilado en esfuerzo (litros de aire ventilado); FRmax: Cantidad máxima de ventilaciones en un minuto durante el esfuerzo (ventilaciones por minuto); RR%: Reserva respiratoria, diferencia entre máxima ventilación voluntaria y la ventilación máxima alcanzada en esfuerzo; FEO₂ max: Fracción de oxígeno espirado (porcentaje de oxígeno presente en el aire espirado); % VT1: Porcentaje al que se alcanza el primer umbral en relación al VO₂max (porcentaje del VO₂max); VO₂ VT1: Valor en mililitros de oxígeno al que se alcanza en VT1 (mililitros/ kilogramos por minuto); FC VT1: Frecuencia cardiaca alcanzada en el primer umbral (latidos en un minuto); %VT2: Porcentaje al que se alcanza el segundo umbral en relación al VO₂max (porcentaje del VO₂max); FC VT2: Frecuencia cardiaca alcanzada en el segundo umbral (latidos en un minuto).

La presentación de resultados de resultados se ha organizado en tres grupos de gráficos y sus correlaciones en base al criterio de parámetros de integración Cardiorrespiratoria-Metabólica, Cardiovasculares y Respiratorios. Siguiendo el esquema de engranajes de Wasserman (Sietsema, 2020).

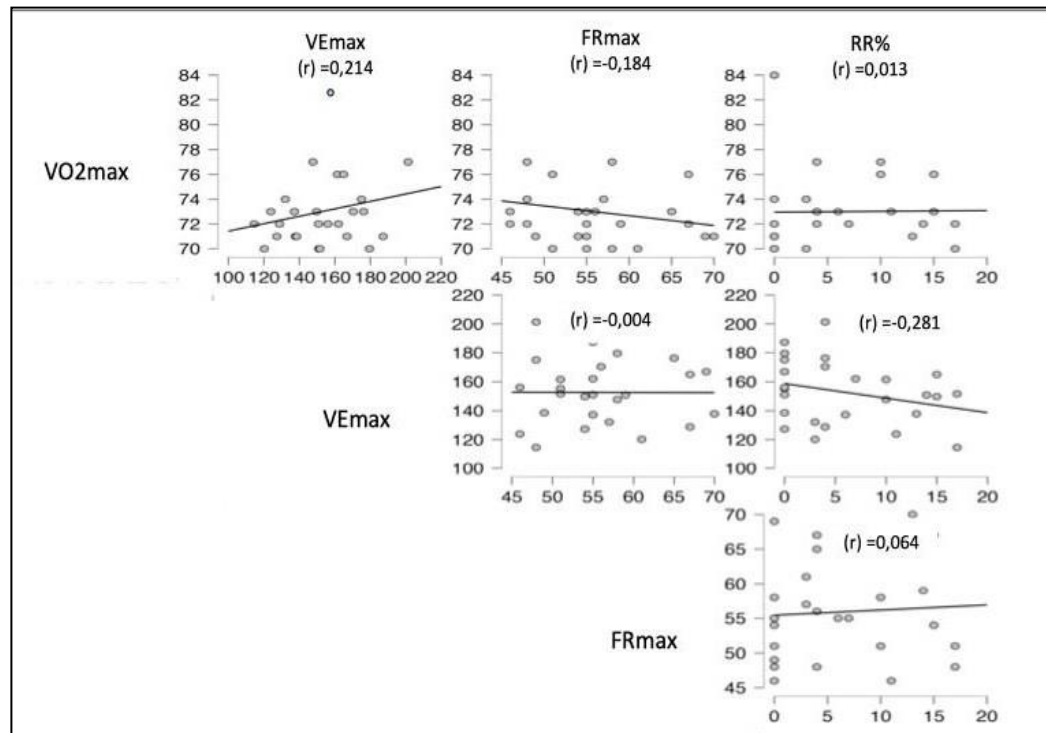


Gráfico 1. Correlación de variables de integración cardiorrespiratoria y metabólica: Edad, VO₂max, VO₂ VT1 y VO₂ VT2

Cuadro de Gráficos agrupados 1: Presenta la distribución de las variables Edad, VO₂max; VO₂ VT1; VO₂ VT2 y sus correlaciones. Se determina correlación pequeña entre Edad y VO₂max ($r = -0,238^*$; $p = 0,24$); Correlación irrelevante entre Edad y VO₂ VT1 ($r = 0,022$; $p = 0,92$) y Edad y VO₂ VT2 ($r = -0,08$; $p = 0,97$); Correlación grande entre VO₂max vs VO₂ VT1 ($r = 0,741^{***}$; $p < 0,001$); VO₂max vs VO₂ VT2 ($r = 0,808^{***}$; $p < 0,001$); y VO₂ VT1 vs VO₂ VT2 ($r = 0,783^{***}$; $p < 0,001$).

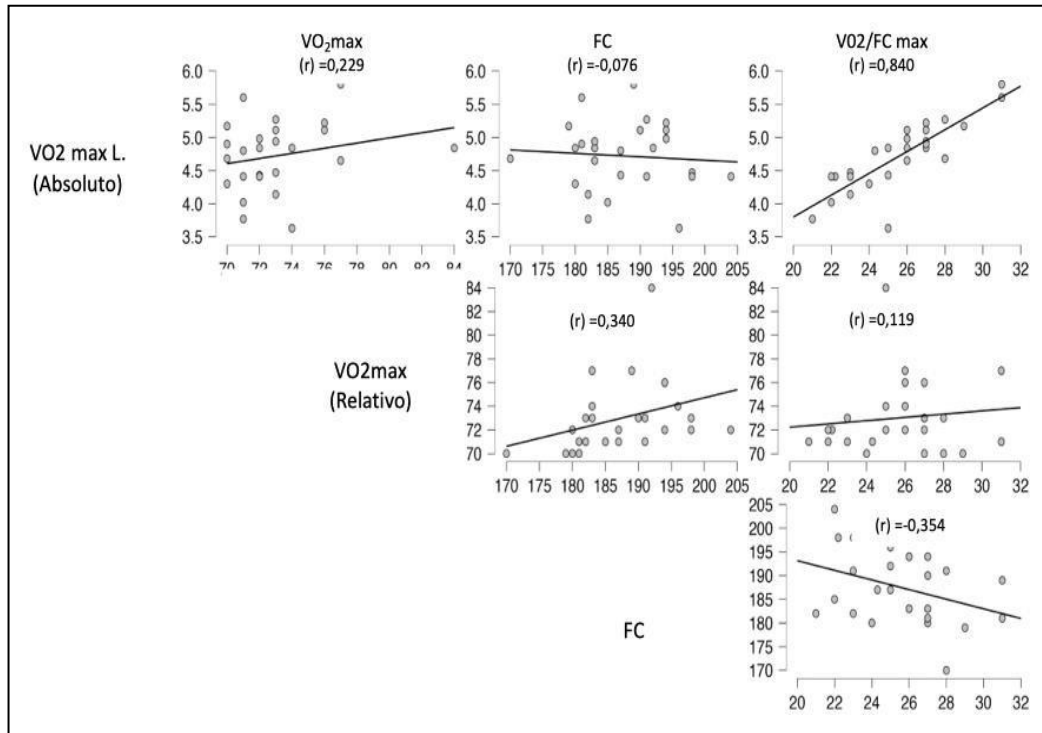


Gráfico 2. Correlación de variables Cardiocirculatoria: VO₂max L., VO₂max, FC, VO₂/FC max

Gráficos agrupados 2: Presenta la distribución de las variables VO₂max L (absoluto); VO₂max (relativo); FC; VO₂/FCmax. y sus correlaciones: Se determina correlación pequeña entre VO₂max L y VO₂max ($r = 0,229^*$; $p = 0,26$); Correlación irrelevante entre VO₂max L y FC ($r = 0,076$; $p = 0,71$); Correlación media entre VO₂max y FC ($r = 0,340^{**}$; $p = 0,09$); Correlación grande entre VO₂max L y VO₂/FC max ($r = 0,840^{***}$; $p < 0,001$); Correlación pequeña entre VO₂max y VO₂/FC max ($r = 0,119^*$; $p = 0,56$); Correlación media entre VO₂/FC max y FC ($r = -0,354$; $p = 0,076$).

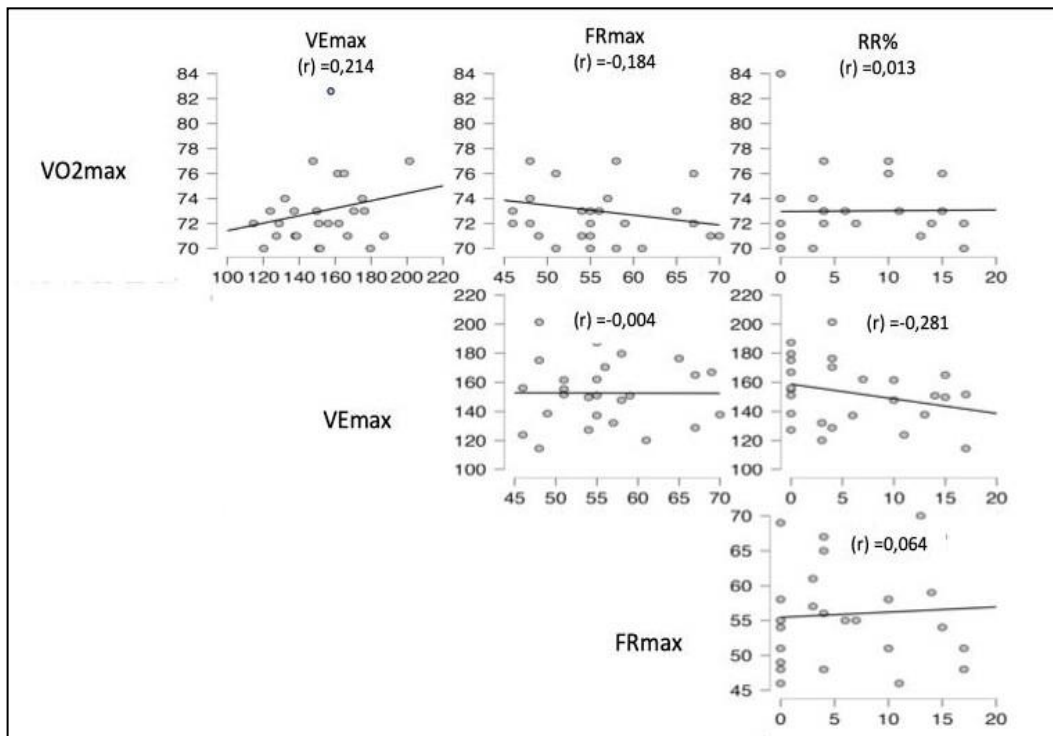


Gráfico 3. Correlación y distribución de las variables respiratorias: VO₂max, VEmax, FRmax, RR%

Gráficos agrupados 3: Presenta la distribución de las variables VO₂max (relativo); VEmax; FRmax; RR% y sus correlaciones: Se determina correlación pequeña entre VO₂max y VE ($r = 0,214^*$; $p = 0,30$); Correlación pequeña entre VO₂max. y FR ($r = -0,184^*$; $p = 0,37$); Correlación irrelevante entre VO₂max y RR% ($r = 0,013$; $p = 0,95$); Correlación irrelevante entre VE y FR ($r = -0,004$; $p = 0,98$); Correlación pequeña entre VE y RR% ($r = -0,281^*$; $p = 0,164$); Correlación irrelevante entre FR y RR% ($r = 0,064$; $p = 0,76$).

4. DISCUSIÓN

El VO₂max es el parámetro más comúnmente utilizado para evaluar la potencia aeróbica de los atletas (Millet et al., 2009). La edad es un factor que define los valores de VO₂max, y la literatura siempre lo ha expresado en tablas y valores normativos, por ejemplo, en un reciente estudio (Petek et al., 2022) se determinó que el grupo de entre 18 y 30 años presentó mayores valores de consumo de oxígeno que el grupo de 30 a 40 años; adicionalmente, un estudio de Herdy et al. (Herdy & Uhlendorf, 2011) evidenció en sujetos entrenados mayor consumo de oxígeno 50,6 ml/kg/min en el grupo de 15 a 24 años por sobre el grupo de 25 a 34 años, quienes presentaron un promedio de 47,4 ml/kg/min; Estos datos están asociados con los resultados presentados en este estudio, donde se presenta una correlación

negativa (pequeña) entre edad y VO_2max , evidenciando la existencia de una tendencia en la que se expresan mayores consumos de oxígeno a menor edad y una tendencia a reducción a mayor edad.

En cuanto a la relación entre VO_2max y VO_2 en VT1 en los deportes de resistencia aeróbica, se ha sugerido que el VO_2 VT1 podría ser un mejor indicador de resistencia aeróbica que el VO_2max , ya que el VT1 puede cambiar sin modificaciones en el VO_2max (Allen et al., 1985; Bishop et al., 1998). Varios estudios han demostrado que en la población general, el entrenamiento aeróbico a menudo mejora la intensidad del ejercicio correspondiente al primer umbral sin aumento concomitante en el VO_2max (Bishop et al., 1998; Edwards et al., 2003). Los resultados obtenidos en nuestro estudio determinan una relación grande entre VO_2max y $\text{VO}_2\text{VT1}$ lo que manifiesta una relación que se puede entender, dado el nivel de entrenamiento y condiciones genéticas de los deportistas seleccionados, pero seguramente existen diferencias propias del tipo de entrenamiento y la disciplina deportiva de cada uno de los participantes quienes presentan un VO_2 mínimo de 42 y un máximo de 57 ml/kg/min en el primer umbral, con una desviación estándar en 3,5 ml. En deportes colectivos, como el fútbol, el entrenamiento en el umbral de lactato (LT) o primer umbral ventilatorio mejoró el nivel de VT1, mientras que el VO_2max permaneció sin cambios (Edwards et al., 2003), es este sentido, nuestro estudio muestra una relación positiva grande entre VT1 y VO_2max , aun cuando la sensibilidad al entrenamiento puede ser específica en tiempos breves de entrenamiento. Por otro lado, el VO_2max es un indicador menos sensible a los cambios en el estado de entrenamiento en los jugadores de fútbol profesionales, que el VT1 como lo evidenció (Edwards et al., 2003). El comienzo de la acumulación de lactato (OBLA) se ha utilizado ampliamente para identificar cambios en el estado de entrenamiento, sin embargo, su uso ha sido criticado debido a la variabilidad entre sujetos (Coyle, 1995) y también porque puede ser el resultado no solo de una anaerobiosis muscular, sino también, de una disminución del aclaramiento total de lactato o un aumento en la producción de lactato en músculos específicos (Hermansen, 1971). Esta valoración puede ser difícil a la hora de discernir un punto de ruptura claro usando estos criterios, y la interpretación de los datos no es completamente objetiva, motivo por el cual se recomienda utilizar dos o más graficas para determinar este punto, tal como se realizó en este estudio (Powers et al., 1984; Yeh et al., 1983).

El VO_2max puede proporcionar un indicador útil de la capacidad aeróbica del atleta, pero su uso es limitado en el monitoreo de los cambios en el estado de entrenamiento. Mientras que, el VT1 como parámetro submáximo puede identificar cambios en el acondicionamiento aeróbico y se sugiere monitorear su situación, aun frente a cambios positivos o negativos en el VO_2max .

Por su parte el VO_2 máximo en estado estable de lactato o VO_2 en VT2 está estrechamente vinculado al rendimiento deportivo, siendo excepcional su utilización en fisiología clínica del ejercicio. Conocer con precisión la relación del VT2 con el VO_2max es de alto interés para los entrenadores, pues permite conocer el nivel de adaptación fisiológica y es de relevancia para determinar intensidad de entrenamiento. Se consideran adecuados para deportistas de resistencia aeróbica, encontrar valores de VT2 al 85% del VO_2max , pudiendo alcanzar valores mayores de 90% registrados en ciclistas profesionales (López Chicharro et al., 2013). Los deportistas de nuestro estudio presentaron un VT2 con una media de 84,6% y un valor máximo de 92% del máximo, en un ciclista de ruta campeón panamericano juvenil, entregando valores en el rango referenciado, que sustenta la alta correlación de 0,808 entre VO_2max y VO_2 VT2.

Por su parte en el análisis de otro parámetro, el “Pulso de Oxígeno”, se ha observado en atletas mexicanos de especialidades deportivas distintas (Pérez et al., 2000). Pulso de oxígeno y su cinética de la fase dos transitoria durante una prueba de esfuerzo máximo de VO_2 en adultos mayores donde se relacionó significativamente con el VO_2max absoluto, pero no en todos los casos con la FCmax , en consecuencia se observaron diferencias significativas de VO_2/FCmax entre grupos de atletas reagrupados por su similitud en VO_2max y no clasificados por especialidad deportiva, para caracterizar el VO_2/FC . El pulso de oxígeno en nuestro estudio presentó una relación grande 0,840 con el VO_2max absoluto, sin relación con la FC, de igual manera que en el estudio de los deportista mexicanos, deduciendo que el alto Pulso de oxígeno presentado en nuestro estudio, promedio de 25,6 ml de oxígeno por latido, dependió mayoritariamente de la contribución de la potencia aeróbica máxima absoluta por sobre la frecuencia cardiaca máxima. En nuestro estudio este parámetro se presentó con variación de entre 21 y 31 ml, con desviación estándar en 2,6 ml, pudiendo ser explicadas por un mayor y/o menor llenado ventricular diastólico temprano. El VO_2/FC con tanta variación, ante similares consumos de oxígeno (superiores a 70ml) puede asociarse teóricamente a una limitante o “potencial de entrenamiento” asociado directamente al gasto cardiaco y su volumen sistólico. Un estudio (Barbier et al., 2006) presenta valores de consumo de oxígeno promedio de 70 ml/kg/min y VO_2/FC de 27,3 en Ciclistas Franceses de nivel nacional, este último valor es muy similar al promedio de valores encontrado en nuestro estudio, considerando que en nuestras mediciones todos los participantes superaron los 70 ml/kg/min, con un promedio de 73, recordando que reclutamos deportistas de resistencia y futbolistas profesionales jóvenes con consumos de oxígeno excepcionales.

En cuanto a los parámetros pulmonares, en un estudio (Segizbaeva & Aleksandrova, 2021) se determinó que la fuerza muscular respiratoria y la función ventilatoria en los atletas de resistencia eran

extraordinariamente superiores a la de atletas de potencia sin entrenamiento aeróbico específico. En este mismo estudio, tanto la presión inspiratoria máxima de la boca (MIP) y la presión espiratoria (MEP) se correlacionaron significativamente con la máxima ventilación voluntaria (MVV) en los atletas de potencia como en los controles, pero no en los atletas de resistencia. El corolario es que el entrenamiento intensivo de resistencia podría resultar en la mejora de la fuerza muscular respiratoria, cumpliendo con el límite superior máximo de la reserva funcional de los músculos respiratorios y la ventilación correspondiente (Sietsema, 2020). En referencia al texto clásico de Wasserman, definen la Reserva Respiratoria, expresada como la diferencia entre la Máxima Ventilación Voluntaria (MVV) y la Máxima ventilación en ejercicio, habitualmente expresada en porcentaje de reserva. Sujetos normales presentan una reserva respiratoria entre 20 a 40% de diferencial (Sue & Hansen, 1984). Mientras que en Atletas extremadamente entrenados se presentan altas tasas metabólicas y una reserva respiratoria inferior que puede llegar a cero en el pico del ejercicio, lo que indica que se ha utilizado toda la capacidad mecánica pulmonar disponible, en el contexto de una espirometría en reposo normal y un $VO_2\text{max}$ supra normal, se cree que esto refleja una limitación mecánico pulmonar secundaria, conferida por el sistema cardiovascular altamente entrenado (Petek et al., 2021), aunque no está del todo claro porque algunos atletas presentan limitación en este parámetro, aun siendo sujetos altamente entrenados, algunos estudios limitados han demostrado el impacto del entrenamiento de la musculatura respiratoria para mejorar este parámetro, aun cuando podría colaborar este tipo de entrenamientos, aún no existe evidencia contundente (Luks et al., 2013). En nuestros deportistas la reserva respiratoria promedio fue de 6% con extremos de 0 y 16,4%, un 33% de la muestra presentó reserva respiratoria con valor 0%. Aun estando todos los atletas por debajo de 20% de RR, se presenta alta variación. Desde nuestro análisis estadístico, se evidencia que no existe correlación entre la RR% y $VO_2\text{max}$ y que frente a la VE y FC presenta correlaciones pequeñas. Recordando que la VE máxima está vinculada con el tamaño del atleta, además de su nivel de entrenamiento. La media de la VE de nuestro estudio fue de 152,7 litros, un valor similar al presentado por (Petek et al., 2022), sobre 26 atletas de resistencia jóvenes entre 18 y 30 años que presentaron una ventilación pico de 160 litros.

En nuestro estudio presenta como principal limitación que no incluimos la variable potencia dado que existieron pruebas de cinta y cicloergómetro (Ciclistas, triatletas, corredores, futbolistas), siendo complejo determinar un mismo parámetro de control de potencia, razón por la cual nos basamos únicamente en los parámetros Cardiorrespiratorios y metabólicos analizados a partir del Ergoespirómetro o carro metabólico. Sin embargo, como fortalezas, podemos mencionar que hasta

donde conocemos, este es el primer estudio sobre consumos de oxígeno máximos excepcionales en atletas chilenos, adicionalmente las relaciones encontradas pueden ser útiles para entrenadores y fisiólogos del ejercicio en la interpretación de las pruebas de ergoespirometría. Finalmente, hemos hecho un esfuerzo por describir y explicar conceptos fisiológicos que normalmente solo se mencionan en los artículos de fisiología del ejercicio, volviendo compleja la lectura para el público no especializado.

5. CONCLUSIONES

Es posible encontrar encontrar con cierta regularidad valores de $VO_2\text{max}$ superiores a 70 ml/kg/min, en deportistas locales, de los cuales más de un tercio corresponde a Futbolistas quienes han superado en muchos casos a deportistas de resistencia aeróbica. En este grupo selecto de deportistas se presentan correlaciones grandes entre el $VO_2\text{max}$ y los umbrales ventilatorios, también existe correlación grande entre el $VO_2\text{max}$ absoluto y el pulso de oxígeno con correlaciones pequeñas e inexistentes entre el consumo de oxígeno y los parámetros ventilatorios.

6. REFERENCIAS

1. Allen, W. K., Seals, D. R., Hurley, B. F., Ehsani, A. A., & Hagberg, J. M. (1985). Lactate threshold and distance-running performance in young and older endurance athletes. *Journal of Applied Physiology*, 58(4), 1281-1284.
2. Balady, G. J., Arena, R., Sietsema, K., Myers, J., Coke, L., Fletcher, G. F., Forman, D., Franklin, B., Guazzi, M., Gulati, M., Keteyian, S. J., Lavie, C. J., Macko, R., Mancini, D., Milani, R. V., American Heart Association Exercise, C. R., Prevention Committee of the Council on Clinical, C., Council on, E., Prevention, . . . Outcomes, R. (2010). Clinician's Guide to cardiopulmonary exercise testing in adults: a scientific statement from the American Heart Association. *Circulation*, 122(2), 191-225. <https://doi.org/10.1161/CIR.0b013e3181e52e69>
3. Barbier, J., Lebillier, E., Ville, N., Rannou-Bekono, F., & Carré, F. (2006). Relationships between sports-specific characteristics of athlete's heart and maximal oxygen uptake. *European Journal of Cardiovascular Prevention and Rehabilitation*, 13(1), 115-121. <https://doi.org/10.1097/01.hjr.0000188243.46664.4c>
4. Beltz, N. M., Gibson, A. L., Janot, J. M., Kravitz, L., Mermier, C. M., & Dalleck, L. C. (2016). Graded exercise testing protocols for the determination of $VO_2\text{max}$: historical perspectives,

- progress, and future considerations. *Journal of Sports Medicine*, 2016(1), 1-12. <https://doi.org/10.1155/2016/3968393>
5. Bishop, D., Jenkins, D. G., & Mackinnon, L. T. (1998). The relationship between plasma lactate parameters, Wpeak and 1-h cycling performance in women. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 30(8), 1270-1275. <https://doi.org/10.1097/00005768-199808000-00014>
 6. Bozzini, B., Pellegrino, J., Walker, A., McFadden, B., Poysick, A., & Arent, S. (2020). Running economy and its correlation to performance and fitness variables in recreationally-trained distance runners. *Comparative Exercise Physiology*, 16(2), 107-112.
 7. Busse, M., Maassen, N., & Konrad, H. (1991). Relation between plasma K⁺ and ventilation during incremental exercise after glycogen depletion and repletion in man. *The Journal of physiology*, 443(1), 469-476.
 8. Buttar, K. K., Saboo, N., & Kacker, S. (2019). A review: Maximal oxygen uptake (VO₂ max) and its estimation methods. *International Journal of Physical Education, Sports, and Health*, 6(6), 24-32.
 9. Cofre-Bolados, C., Ferrari, G., Valdivia-Moral, P., Vidal-Díaz, F., Ramírez-Vélez, R., & Izquierdo-Redin, M. (2022). Sub Maximal Ergospirometry Parameters in Untrained Non-Frail Octogenarian Subjects. *Medicina*, 58(3), 1-10.
 10. Coyle, E. F. (1995). Substrate utilization during exercise in active people. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 61(4), 968-979. <https://doi.org/10.1093/ajcn/61.4.968S>
 11. Davies, R. C., Rowlands, A. V., Poole, D. C., Jones, A. M., & Eston, R. G. (2011). Eccentric exercise-induced muscle damage dissociates the lactate and gas exchange thresholds. *Journal of Sports Sciences*, 29(2), 181-189.
 12. Edwards, A., Clark, N., & Macfadyen, A. (2003). Lactate and ventilatory thresholds reflect the training status of professional soccer players where maximum aerobic power is unchanged. *Journal of Sports Science & Medicine*, 2(1), 23-29.
 13. Galán-Rioja, M. Á., González-Mohíno, F., Poole, D. C., & González-Ravé, J. M. (2020). Relative Proximity of Critical Power and Metabolic/Ventilatory Thresholds: Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Medicine*, 50(10), 1771–1783. <https://doi.org/10.1007/s40279-020-01314-8>
 14. Goss-Sampson, M. A., & Meneses, J. (2019). *Análisis estadístico con JASP: Una guía para estudiantes*. Open University of Catalonia.
 15. Guazzi, M., Adams, V., Conraads, V., Halle, M., Mezzani, A., Vanhees, L., Arena, R., Fletcher, G. F., Forman, D. E., & Kitzman, D. W. (2012). Clinical recommendations for cardiopulmonary exercise testing data assessment in specific patient populations. *Circulation*, 126(18), 2261- 2274.

16. Herdy, A. H., & Uhlendorf, D. (2011). Reference values for cardiopulmonary exercise testing for sedentary and active men and women. *Arquivos Brasileiros de Cardiologia*, 96, 54-59.
17. Hermansen, L. (1971). Lactate production during exercise. Muscle Metabolism During Exercise: Proceedings of a Karolinska Institutet Symposium held in Stockholm. *Sports Medicine*, 29, 373-386.
18. Jones, A. M., Kirby, B. S., Clark, I. E., Rice, H. M., Fulkerson, E., Wylie, L. J., Wilkerson, D. P., Vanhatalo, A., & Wilkins, B. W. (2021). Physiological demands of running at 2-hour marathon race pace. *Journal of Applied Physiology*, 130(2), 369-379.
<https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00647.2020>
19. Kostis, J. B., Moreyra, A., Amendo, M., Di Pietro, J., Cosgrove, N., & Kuo, P. (1982). The effect of age on heart rate in subjects free of heart disease. Studies by ambulatory electrocardiography and maximal exercise stress test. *Circulation*, 65(1), 141-145.
<https://doi.org/10.1161/01.cir.65.1.141>
20. La Gerche, A., Burns, A. T., Taylor, A. J., MacIsaac, A. I., Heidbüchel, H., & Prior, D. L. (2012). Maximal oxygen consumption is best predicted by measures of cardiac size rather than function in healthy adults. *European Journal of Applied Physiology*, 112, 2139-2147.
<https://doi.org/10.1007/s00421-011-2184-9>
21. Laukkanen, J. A., Araújo, C. G. S., Kurl, S., Khan, H., Jae, S. Y., Guazzi, M., & Kunutsor, S. K. (2018). Relative peak exercise oxygen pulse is related to sudden cardiac death, cardiovascular and all-cause mortality in middle-aged men. *European Journal of Preventive Cardiology*, 25(7), 772-782. <https://doi.org/10.1177/2047487318761679>
22. López Chicharro, J., Vicente Campos, D., & Cancino López, J. (2013). *Fisiología del entrenamiento aeróbico: una visión integrada*. Editorial Médica Panamericana.
23. Lucia, A., Esteve-Lanao, J., Oliván, J., Gómez-Gallego, F., San Juan, A. F., Santiago, C., Pérez, M., Chamorro-Vina, C., & Foster, C. (2006). Physiological characteristics of the best Eritrean runners—exceptional running economy. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 31(5), 530-540. <https://doi.org/10.1139/h06-029>
24. Lucia, A., Hoyos, J., Pérez, M., Santalla, A., & Chicharro, J. L. (2002). Inverse relationship between VO₂max and economy/efficiency in world-class cyclists. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 34(12), 2079-2084. <https://doi.org/10.1249/01.MSS.0000039306.92778.DF>
25. Luks, A. M., Glenny, R. W., & Robertson, H. T. (2013). *Introduction to cardiopulmonary exercise testing*. Springer.

26. Mezzani, A. (2017). Cardiopulmonary exercise testing: basics of methodology and measurements. *Annals of the American Thoracic Society*, 14, 3-11. <https://doi.org/10.1513/AnnalsATS.201612-997FR>
27. Mezzani, A., Hamm, L. F., Jones, A. M., McBride, P. E., Moholdt, T., Stone, J. A., Urhausen, A., & Williams, M. A. (2013). Aerobic exercise intensity assessment and prescription in cardiac rehabilitation: a joint position statement of the European Association for Cardiovascular Prevention and Rehabilitation, the American Association of Cardiovascular and Pulmonary Rehabilitation and the Canadian Association of Cardiac Rehabilitation. *European Journal of Preventive Cardiology*, 20(3), 442-467. <https://doi.org/10.1177/2047487312460484>
28. Millet, G. P., Vleck, V. E., & Bentley, D. J. (2009). Physiological differences between cycling and running lessons from triathletes. *Sports Medicine*, 39, 179-206. <https://doi.org/10.2165/00007256-200939030-00002>
29. Miyamoto-Mikami, E., Zempo, H., Fuku, N., Kikuchi, N., Miyachi, M., & Murakami, H. (2018). Heritability estimates of endurance-related phenotypes: A systematic review and meta-analysis. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 28(3), 834-845. <https://doi.org/10.1111/sms.12958>
30. Mooses, M., & Hackney, A. C. (2017). Anthropometrics and body composition in East African runners: potential impact on performance. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 12(4), 422-430. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2016-0408>
31. Myers, J., Arena, R., Cahalin, L. P., Labate, V., & Guazzi, M. (2015). Cardiopulmonary exercise testing in heart failure. *Current Problems in Cardiology*, 40(8), 322-372. <https://doi.org/10.1016/j.cpcardiol.2015.01.009>
32. Nicolò, A., Bazzucchi, I., Felici, F., Patrizio, F., & Sacchetti, M. (2015). Mechanical and electromyographic responses during the 3-min all-out test in competitive cyclists. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 25(6), 907-913. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2015.08.006>
33. Opondo, M. A., Sarma, S., & Levine, B. D. (2015). The cardiovascular physiology of sports and exercise. *Clinics in Sports Medicine*, 34(3), 391-404. <https://doi.org/10.1016/j.csm.2015.03.004>
34. Paavolainen, L., Häkkinen, K., Hämmäläinen, I., Nummela, A., & Rusko, H. (1999). Explosive-strength training improves 5-km running time by improving running economy and muscle power. *Journal of Applied Physiology*, 86(5), 1527-1533. <https://doi.org/10.1152/jappl.1999.86.5.1527>
35. Pérez, J. P., Cruz, P. O., Chávez, Y. F., & Mendoza, J. L. (2000). Pulso máximo de oxígeno en atletas mexicanos de alto rendimiento. *Revista del Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias*, 13(2), 73-84.

36. Petek, B. J., Gustus, S. K., & Wasfy, M. M. (2021). Cardiopulmonary Exercise Testing in Athletes: Expect the Unexpected. *Current Treatment Options in Cardiovascular Medicine*, 23(7), 1-49. <https://doi.org/10.1007/s11936-021-00928>
37. Petek, B. J., Tso, J. V., Churchill, T. W., Guseh, J. S., Loomer, G., DiCarli, M., Lewis, G. D., Weiner, R. B., Kim, J. H., & Wasfy, M. M. (2022). Normative cardiopulmonary exercise data for endurance athletes: the Cardiopulmonary Health and Endurance Exercise Registry (CHEER). *European Journal of Preventive Cardiology*, 29(3), 536-544.
38. Poole, D. C., Rossiter, H. B., Brooks, G. A., & Gladden, L. B. (2021). The anaerobic threshold: 50+ years of controversy. *Journal of Physiology*, 599(3), 737-767. <https://doi.org/10.1113/JP279963>
39. Robergs, R. A., & Landwehr, R. (2002). The surprising history of the "HRmax=220-age" equation. *Journal of Exercise Physiology Online*, 5(2), 1-10.
40. Powers, S. K., Dodd, S., & Garner, R. (1984). Precision of ventilatory and gas exchange alterations as a predictor of the anaerobic threshold. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 52(2), 173–177. <https://doi.org/10.1007/BF00433388>
41. Rønnestad, B. R., Hansen, J., Stensløyken, L., Joyner, M. J., & Lundby, C. (2019). Case studies in physiology: temporal changes in determinants of aerobic performance in individual going from alpine skier to world junior champion time trial cyclist. *Journal of Applied Physiology*, 127(2), 306-311. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00798.2018>
42. Salazar Martínez, J. L., & Jiménez Trujillo, J. O. (2018). Evaluación del consumo máximo de oxígeno (VO₂max) y el porcentaje de grasa en futbolistas jóvenes. *VIREF Revista De Educación Física*, 7(1), 50–86.
43. Sarma, S., & Levine, B. D. (2016). Beyond the Bruce Protocol: Advanced Exercise Testing for the Sports Cardiologist. *Cardiology Clinics*, 34(4), 603-608. <https://doi.org/10.1016/j.ccl.2016.06.009>
44. Segales, D., Cofre-Bolados, C., Tuesta, M., & Farias-Valenzuela, C. (2023). Maximum oxygen consumption and muscle efficiency in non-professional youth and professional adult soccer players. *SPORT TK-Euro-American Journal of Sports Sciences*, 12, 1-7. <https://doi.org/10.6018/sportk.588691>
45. Segizbaeva, M. O., & Aleksandrova, N. P. (2021). Respiratory Muscle Strength and Ventilatory Function Outcome: Differences Between Trained Athletes and Healthy Untrained Persons. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 1289, 89–97. https://doi.org/10.1007/5584_2020_554

46. Sharma, S., Merghani, A., & Mont, L. (2015). Exercise and the heart: the good, the bad, and the ugly. *European Heart Journal*, 36(23), 1445-1453.
47. Sietsema, K. E. S., William, W., Sue, D. Y., & Ward, J. (2020). *Wasserman & Whipp's principles of exercise testing and interpretation* (6th ed.). Lippincott Williams & Wilkins.
48. Silva, C. G. D. S. E., Castro, C. L. B. D., Franca, J. F., Bottino, A., Myers, J., & Araújo, C. G. S. D. (2018). Cardiorespiratory Optimal Point in Professional Soccer Players: A Novel Submaximal Variable during Exercise. *International Journal of Cardiovascular Sciences*, 14, 1-13. <https://doi.org/10.5935/2359-4802.20180030>
49. Sjodin, B., & Svedenhag, J. (1985). Applied physiology of marathon running. *Sports Medicine*, 2, 83-99.
50. Støren, Ø. (2009). *Running and cycling economy in athletes: Determining factors, training interventions, and testing* [Doctoral thesis, Norwegian University of Science and Technology].
51. Suchomel, T. J., Nimphius, S., & Stone, M. H. (2016). The importance of muscular strength in athletic performance. *Sports Medicine*, 46, 1419-1449.
52. Sue, D. Y., & Hansen, J. E. (1984). Normal values in adults during exercise testing. *Clinics in Chest Medicine*, 5(1), 89-98.
53. Tønnessen, E., Haugen, T. A., Hem, E., Leirstein, S., & Seiler, S. (2015). Maximal aerobic capacity in the winter-Olympics endurance disciplines: Olympic-medal benchmarks for the time period 1990–2013. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 10(7), 835-839.
54. Tucker, R., Dugas, J., & Fitzgerald, M. (2009). *Runner's World the Runner's Body: How the Latest Exercise Science Can Help You Run Stronger, Longer, and Faster*. Rodale Books.
55. Yeh, M. P., Gardner, R. M., Adams, T. D., Yanowitz, F. G., & Crapo, R.O. (1983). Anaerobic threshold: Problems of determination and validation. *Journal of Applied Physiology*, 55, 1178-1186.
56. Zinner, C., Sperlich, B., Wahl, P., & Mester, J. (2015). Classification of selected cardiopulmonary variables of elite athletes of different age, gender, and disciplines during incremental exercise testing. *SpringerPlus*, 4, 1-9. <https://doi.org/10.1186/s40064-015-1341-8>

AUTHOR CONTRIBUTIONS

All authors listed have made a substantial, direct and intellectual contribution to the work, and approved it for publication.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

FUNDING

This research received no external funding.

COPYRIGHT

© Copyright 2024: Publication Service of the University of Murcia, Murcia, Spain.