

VALIDEZ DEL DÉFICIT MÁXIMO DE OXÍGENO ACUMULADO COMO ÍNDICE DE CAPACIDAD ANAERÓBICA

L.Calbet, J.A.; Dorado, C.; Sanchis, J.; Cortadellas, J.
y Ferragut, C.

Departamento de Educación Física
Universidad de Las Palmas de Gran Canaria
Las Palmas de Gran Canaria

RESUMEN

Para determinar la validez del déficit acumulado de oxígeno (DMOA) como índice de capacidad anaeróbica, en 29 varones, estudiantes de Educación Física, se determinó el DMOA, la concentración de lactato en sangre capilar al finalizar un test supramáximo al 120 % VO₂max, la potencia media y máxima desarrolladas en el test de Wingate y la masa muscular de las extremidades inferiores mediante absorciometría fotónica dual de rayos X. El DMOA correlacionó con la concentración de lactato en sangre alcanzada al final del test de capacidad anaeróbica ($r=0.43$, $p<0.05$, $n=28$), con el trabajo realizado y con el VO₂ acumulado en el test de capacidad anaeróbica ($r=0.59$, $p<0.001$, $n=28$ y $r=0.56$, $p<0.01$, $n=29$, respectivamente). La lactatemia al final del test de capacidad anaeróbica correlacionó con trabajo realizado en el test de capacidad anaeróbica en valores absolutos ($r=0.49$, $p<0.01$, $n=27$) y con el trabajo dividido entre la masa muscular de las extremidades inferiores ($r=0.65$, $p<0.001$, $n=26$). No se observaron correlaciones significativas entre el DMOA y la potencia máxima, ni tampoco entre el DMOA y la potencia media desarrolladas en el test Wingate, ya sea expresadas en valores absolutos o referidos a la masa muscular de las piernas. Tampoco correlacionó la lactatemia alcanzada al final del test de capacidad anaeróbica con la potencia máxima ni con la potencia media desarrollada en el test de Wingate. Aunque conceptualmente el DMOA es el mejor no invasivo procedimiento para medir la capacidad anaeróbica, la ausencia de correlaciones con otras variables que se han mostrado útiles en la evaluación de las cualidades anaeróbicas limita su interés desde el punto de vista práctico.

PALABRAS CLAVE: déficit de oxígeno, capacidad anaeróbica, rendimiento, validez, condición física.

ABSTRACT

To assess the validity of the maximal accumulated oxygen deficit (MAOD) as a measure of the anaerobic capacity, the following variables were determined in twenty nine male Physical Education students: the DMOA, the blood lactate concentration at the end of a exhausting supramaximal bout 120 % VO₂max, the maximal and the mean power attained during a Wingate test, and the muscle mass of the legs by dual X-ray absorptiometry. A relationship was found between the MAOD and the blood lactate concentration at the end of the supramaximal bout ($r=0.43$, $p<0.05$, $n=28$). MAOD was also related with both the work performed and the accumulated VO₂ achieved during the supramaximal exercise ($r=0.59$, $p<0.001$, $n=28$ y $r=0.56$, $p<0.01$, $n=29$, respectively). The blood lactate concentration at the end of the supramaximal exercise was correlated with the work performed during the supramaximal exercise ($r=0.49$, $p<0.01$, $n=27$). This relationship was stronger after accounting for differences in legs muscle mass ($r=0.65$, $p<0.001$, $n=26$). No relationship was found between MAOD and Wingate maximal and mean power output, even after accounting for differences in legs muscle mass. Neither there was a relationship between the maximal or mean power attained during the Wingate and the blood lactate concentration at the end of the supramaximal exercise. Despite that theoretically the MAOD is the best non-invasive procedure to assess the anaerobic capacity, the weakness of the relationship between MAOD and other variables commonly used in the assessment of the anaerobic qualities limits its interest from a practical perspective.

KEY WORDS: Oxygen deficit, anaerobic capacity, performance, validity, fitness.

INTRODUCCIÓN

Puesto que la capacidad anaeróbica, o cantidad máxima de energía que pueden suministrar el metabolismo energético anaeróbico durante un tipo específico de esfuerzo de intensidad elevada (Green 1994), no se puede medir de forma directa, se han propuesto varios procedimientos indirectos para determinarla, como por ejemplo: tests de salto vertical, esprints de corta duración y esprints prolongados, tests de ascenso rápido de escalones, esfuerzos supramáximos hasta el agotamiento, medición de la deuda máxima de O₂, determinación de la concentración máxima de lactato en sangre, determinación del cambio de pH sanguíneo o muscular durante el esfuerzo, determinación de la capacidad tampón del músculo, cuantificación directa de la concentración muscular de lactato y fosfágenos (mediante biopsia muscular o espectrometría de resonancia magnética nuclear) y, últimamente, la medición del déficit máximo de O₂ acumulado (para revisión, Vandewalle y col. 1987; Saltin 1990; Gastin 1994). El principal problema con que se enfrentan la mayoría de estos procedimientos reside en que su validez es dudosa en unos casos e imposible de establecer en otros.

Durante el esfuerzo de baja intensidad, el VO₂ alcanza valores estables en 2-3 min por lo que el VO₂ en estado estable refleja el coste energético del esfuerzo (Hermansen 1969; Henson y col. 1989; Poole y col. 1994). En estas condiciones, es posible determinar la contribución del metabolismo energético anaeróbico al gasto energético como la diferencia entre la demanda de O₂ y el VO₂ (Krogh y Lindhard J, 1919/20; Hermansen 1969). Para ello, es necesario multiplicar la demanda de O₂, expresada por ejemplo en ml.min⁻¹, por la duración en minutos del esfuerzo, para obtener la demanda total de O₂. Posteriormente, se resta a la demanda total de O₂ la cantidad total de O₂ consumido durante el esfuerzo. A esta diferencia se la ha denominado clásicamente déficit de O₂ (Krogh y Lindhard J, 1919/20; Hermansen 1969). En cambio, durante el ejercicio de alta intensidad la demanda de O₂ es superior al VO₂, por lo que no puede ser determinada directamente, sino que tiene que ser estimada. En la década de los 70, se suponía que la demanda de O₂ a una intensidad de esfuerzo determinada era similar en todos los sujetos, asumiéndose la misma eficiencia mecánica para todos los sujetos, habiéndose utilizado fundamentalmente eficiencias del 19.5 al 22.5 % (strand y Saltin 1961; Karlsson y Saltin 1970, 1971; Pate y col. 1983). Posteriormente, se demostró que la demanda de O₂ correspondiente al esfuerzo supramáximo debe ser determinada individualmente (Hermansen y Medbø

1984; Medbø y col. 1988). En consecuencia, Hermansen y Medbø (1984) propusieron un método que permite estimar la demanda de O₂ de un esfuerzo supramáximo a partir de la extrapolación por regresión lineal de la relación entre VO₂ e intensidad, determinada a intensidades de esfuerzo submáximas. El déficit de oxígeno acumulado se calcula de la misma forma que durante el esfuerzo submáximo, es decir como la diferencia entre la demanda acumulada de oxígeno y el VO₂ acumulado, asumiendo que la demanda de oxígeno permanece constante durante el esfuerzo de alta intensidad, y que la relación entre VO₂ e intensidad de esfuerzo es lineal. Más adelante, Medbø y col. (1988) demostraron que el déficit de oxígeno durante el esfuerzo de intensidad supramáxima alcanza valores máximos cuando la intensidad del esfuerzo es tal, que el agotamiento se produce entre 2 y 7 min.

Aunque desde el punto de vista teórico el déficit máximo de oxígeno acumulado (DMOA) parece ser el único procedimiento utilizable para efectuar una evaluación cuantitativa de la capacidad anaeróbica (Saltin 1990), existen importantes dudas acerca de su validez y de su aplicabilidad en la práctica (Bangsbo 1996). Por lo tanto, los objetivos de este estudio han sido determinar indirectamente la validez del DMOA como índice de capacidad anaeróbica, comprobando si los valores de DMOA se relacionan con la potencia media y máxima desarrollada en el test de Wingate. Así mismo, comprobar si el DMOA correlaciona con lactacidemia alcanzada después de un test que produzca el agotamiento en alrededor de 2 min y verificar que papel juega la masa muscular activada durante el esfuerzo en el DMOA.

MATERIAL Y MÉTODOS

SUJETOS

Participaron en este trabajo 29 varones, estudiantes de Educación Física, que tras ser informados acerca del protocolo experimental dieron su consentimiento voluntario para someterse a las pruebas que se describen a continuación, que se llevaron a cabo a lo largo de 10 a 12 semanas. Las características físicas de los sujetos quedan resumidas en la Tabla I. Los sujetos fueron aleccionados sobre la importancia de no realizar ningún tipo de ejercicio extenuante y de no alterar su actividad física habitual durante todo el período experimental, así como de mantener un consumo adecuado de hidratos de carbono en las 48 h previas a la realización de una prueba. Todas las pruebas se realizaron bajo control médico. Las características generales de los sujetos quedan reflejadas en la Tabla I.

Tabla 1. Características físicas de los sujetos y resultados en los test de DMOA, rectas de economía y test de Wingate.

Características físicas de los sujetos					
EDAD (años)	TALLA (cm)	MASA CORPORAL (kg)	%GRASA CORPORAL	M. MUSCULAR EEII (kg)	VO ₂ max (ml.kg ⁻¹ .min ⁻¹)
23.6 ± 2.1	176.7 ± 6.2	73.6 ± 7.6	12.3 ± 3.6	20.793 ± 2.257	55.4 ± 6.1
Tests de capacidad anaeróbica (-120 % VO ₂ max)					
DMOA (ml.kg ⁻¹)	TRABAJO (kJ)	VO ₂ ACU (ml)	DURACIÓN (s)	LACTFIN (mM)	LACTMAX (mM)
65.6 ± 14.7	55.408 ± 9.832	6748 ± 1420	146.5 ± 13.4	9.8 ± 2.2	13.3 ± 1.2*
Rectas de economía de pedaleo					
INTERCEPCIÓN (ml O ₂)	PENDIENTE (ml O ₂ .w ⁻¹ .min ⁻¹)				
561 ± 286	11.13±1.5				
Tests de Wingate					
POTENCIA MAX (w)	POTENCIA MEDIA (w)	FUERZA FRENADO (kp)			
1112 ± 167	861 ± 105	0.11 ± 0.02			

DMOA: Déficit máximo de oxígeno acumulado; **TRABAJO** y **VO₂ACU:** trabajo total y VO₂ acumulado en los tests de capacidad anaeróbica; **DURACIÓN:** tiempo transcurrido hasta el agotamiento en el test de capacidad anaeróbica; **LACTFIN:** concentración sanguínea de lactato al final de los tests de capacidad anaeróbica; **LACTMAX:** máxima concentración sanguínea de lactato alcanzada durante los 5 primeros minutos de la recuperación, tras los tests de capacidad anaeróbica; **M. MUSCULAR EEII:** masa muscular de las extremidades inferiores. * Sólo se determinó esta variable en 10 sujetos.

PROCEDIMIENTOS

Previamente al comienzo de las pruebas los sujetos acudieron al laboratorio en tres ocasiones para familiarizarse con el pedaleo en cicloergómetro y con los test que deberían realizar posteriormente. Así mismo, aprendieron a mantener una frecuencia de pedaleo constante frente a cargas submáximas y supramáximas. Las pruebas realizadas fueron las siguientes:

- 1.- Valoración antropométrica y determinación de la composición corporal.
- 2.- Test incremental hasta el agotamiento.
- 3.- Tests rectangulares submáximos para la determinación de la recta de economía.
- 4.- Test rectangulares supramáximos hasta el agotamiento.
- 5.- Test de Wingate.
- 6.- Determinación de la concentración de lactato en sangre capilar.

La frecuencia de pedaleo en todas las pruebas osciló entre 70-80 RPM, los sujetos pudieron regularla durante todo el test mirando la pantalla del cicloergómetro. Así mismo, los sujetos fueron instruidos acerca de la importancia de resistir el esfuerzo el mayor tiempo posible en los tests incrementales hasta agotamiento y en los el tests rectangulares supramáximos. Estas pruebas se daban por finalizadas cuando se observaba una disminución de la frecuencia de pedaleo, durante más de 10 segundos, con incapacidad para alcanzar nuevamente el rango de frecuencia de pedaleo establecido (70-80 RPM).

Valoración antropométrica y determinación de la composición corporal.

La talla se midió con un tallímetro (Atlántida, Año Sayol, S.A.) de 1 mm de precisión, y la masa corporal mediante una balanza (Atlántida, Año Sayol, S.A.) con una precisión de 100 g. La balanza fue calibrada con masas patrón certificadas de la clase M1. El % de grasa corporal y la composición corporal regional se obtuvieron mediante absorciometría fotónica dual de rayos X (DXA) (Hologic QDR-1500, Massachusetts), tal y como hemos descrito con anterioridad (López Calbet y col. 1997a). Se determinó la masa magra libre de grasa de las extremidades inferiores y una vez sumadas ambas piernas, el valor obtenido se tomó como masa muscular, pues recientemente se ha demostrado que la masa magra en las extremidades medida por DXA es equivalente a la masa muscular (Wang y col. 1996).

Test incremental hasta el agotamiento.

Se programó el cicloergómetro para que la carga inicial fuese de 20W y ésta fuera incrementándose 20W cada min. Para determinar la potencia máxima alcanzada (W_{max}), se siguieron las recomendaciones de Kuipers y col. (1985), de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$W_{max} = WF + (t/60) \times W$$

Ecuación 1

donde "WF" es la última carga completada expresada en vatios, "t" es el tiempo durante el cual se mantuvo la frecuencia de pedaleo en la última carga, expresado en segundos y "W" es el incremento de carga por min (20W). Este procedimiento permite determinar la W_{max} con un CV inferior al 3 % (López Calbet 1993). Todos los tests

se realizaron en un cicloergómetro de freno electromagnético programable ERGO-LINE (Ergo-metrics 900, ERGO-LINE Germany) el cual se encontraba conectado a un analizador de gases (CPX, Medical Graphics Corporation, St. Paul Minnesota). Este cicloergómetro es capaz de mantener constante el trabajo realizado, a expensas de modificar la fuerza de frenado, contrarrestando los cambios que puedan producirse en la frecuencia de pedaleo.

Las variables ventilatorias fueron registradas respiración a respiración mediante un sistema automático de circuito abierto (CPX, Medical Graphics Corporation, St. Paul Minnesota). Este analizador permite medir en cada respiración la VE, el VCO₂, el VO₂, la pETCO₂, la pETCO₂, el RER y la frecuencia respiratoria. En nuestro laboratorio, las determinaciones de VO₂ tienen un CV próximo al 5 % cuando los tests se realizan en estudiantes de Educación Física convenientemente familiarizados (López Calbet y col. 1995a). Las variables ventilatorias fueron promediadas en intervalos de 20 segundos. Se consideró como VO₂max el valor más elevado de VO₂ observado en las pruebas realizadas. La frecuencia cardíaca se registró cada 5 segundos mediante un cardiotacómetro (Polar Advantage XL Heart Rate Monitor, Sport Tester 4000, Polar).

Tests rectangulares submáximos para la determinación de la recta de economía.

Los sujetos fueron sometidos a 6-7 cargas submáximas de 6 min de duración cada una, con intervalos de descanso de 3 min entre cargas. Estos tests también se efectuaron a una frecuencia de pedaleo de 70-80 RPM, con el cicloergómetro descrito en el apartado anterior. La intensidad de las cargas estuvo comprendida entre el 60-90 % del VO₂max. Las cargas se administraron en orden creciente con incrementos de 20W. Para evitar un excesivo aumento de la temperatura corporal con el esfuerzo prolongado, los sujetos fueron refrigerados mediante un ventilador e ingirieron un total de 350 ml de agua durante las pausas.

Para la determinación de la relación VO₂/intensidad, se procedió a calcular el VO₂ medio durante los dos últimos min de cada carga. Aquellas cargas en las que no se observó una estabilización del VO₂ fueron excluidas del análisis. Mediante regresión lineal se obtuvo la ecuación que definía la relación individual VO₂/intensidad para esfuerzos en estado estable. Sólo fueron aceptadas aquellas rectas cuyo coeficiente de regresión lineal presentó una probabilidad de ser debido al azar inferior al 5 %.

Test rectangulares supramáximos hasta el agotamiento.

Antes de comenzar los tests supramáximos se midió el VO₂ en reposo, mientras los sujetos permanecían sentados sobre el cicloergómetro. Posteriormente, realizaron un calentamiento consistente en pedalear durante 1 min a 80, 100, 120, 140, 120, 100 y 80 W. Una vez finalizado el calentamiento, los sujetos permanecieron sentados en el cicloergómetro hasta que su VO₂ alcanzó valores cercanos a los de reposo ($\pm 30\%$) y el RER fue < 1 . Tras preguntarle al sujeto si se encontraba totalmente repuesto, se iniciaba el test rectangular supramáximo. Los tests supramáximos se realizaron con una carga constante, un 10 % superior a la W_{max} alcanzada en el test incremental hasta el agotamiento. Estudios previos en nuestro laboratorio (López Calbet 1993; Chavarren 1996), han demostrado que este incremento de la W_{max}, es adecuado para que las pruebas supramáximas tengan una duración entre 2 y 4 min, tal y como han recomendado Medbø y col. (1988).

Al comenzar el test, los sujetos ajustaron rápidamente la frecuencia de pedaleo a 70-80 RPM, manteniéndola en ese rango hasta el agotamiento. El DMOA se determinó aplicando el procedimiento descrito por Medbø (Medbø y col. 1988; Medbø y Tabata 1989). Brevemente, el consumo de oxígeno acumulado (VO₂ACU) durante la prueba se determinó a partir de la suma de los valores de VO₂ proporcionados por el analizador de gases, respiración a respiración. La demanda de oxígeno en ml.min⁻¹ correspondiente a la carga utilizada en el test supramáximo se halló por extrapolación lineal, a partir de la relación VO₂/intensidad. La demanda de oxígeno acumulada en ml se obtuvo multiplicando la demanda por minuto por la duración de la prueba en min. El DMOA se calculó restando de la demanda acumulada, el VO₂ acumulado (VO₂ACU).

Los tests supramáximos fueron repetidos en 4 ocasiones a los largo de 6-8 semanas, para establecer la fiabilidad de la determinación del DMOA (López Calbet y col. 1997b). Antes de cada prueba, todos los aparatos fueron calibrados conforme a las especificaciones del fabricante. Todas las pruebas se realizaron en condiciones medioambientales similares. Los sujetos se encontraban en estado postabsortivo, habiendo realizado la última ingesta de alimentos, al menos, 4 horas antes de iniciar cada prueba. Entre cada prueba transcurrieron más de siete días, para evitar el efecto entrenamiento que podría ocasionar la repetición de las mismas.

Test de Wingate.

Dos semanas después de haber terminado los tests supramáximos, los sujetos acudieron nuevamente al laboratorio para efectuar un test de Wingate de 30 s en un cicloergómetro Monark 818E. Para ello, en primer lugar, se determinó la fuerza

óptima de frenado, siguiendo las recomendaciones de Vandewalle (1987). Brevemente, cada sujeto efectuó 5 tests fuerza-velocidad en el cicloergómetro de 12 s de duración, frente a 5 fuerzas de frenado diferentes, con pausas de descanso entre tests de 10-15 min. Uno o dos días después, volvieron a acudir al laboratorio para efectuar el Test de Wingate con la fuerza de frenado óptima, es decir, aquella fuerza de frenado que permitía alcanzar el mayor nivel de potencia. Para determinar la potencia máxima instantánea el cicloergómetro fue dotado de un sensor capaz de medir la velocidad de la cadena, de tal manera que la velocidad de pedaleo fue valorada con una precisión de 2-3 ms por vuelta (López Calbet y col. 1995b). Los valores de potencia obtenidos fueron corregidos en función del trabajo de aceleración conforme a las indicaciones de Lakomy (Lakomy 1986; Calbet y col. 1997).

Determinación de la concentración de lactato en sangre capilar.

En todos los sujetos se determinó la concentración de lactato en sangre capilar obtenida del lóbulo de la oreja, previamente hiperemizado mediante la aplicación local Finalgón crema ®. La concentración de lactato se midió en sangre total (25 μ l), mediante un analizador de lactato YSI 1500 Sport, que fue preparado con agente hemolizante (Triton X). En estas condiciones de funcionamiento, presenta una respuesta lineal para concentraciones de lactato comprendidos entre 1 y 26 mM con un CV próximo al 1 % (López Calbet y col. 1993). Las tomas de lactato se realizaron en condiciones basales, antes del calentamiento y antes de iniciar el test supramáximo, así como a la finalización del mismo. En 10 sujetos, también se determinó la lactatemia cada min, durante los 5 primeros min de la recuperación.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se efectuó una estadística descriptiva del conjunto de variables analizadas. El primer test supramáximo fue descartado y considerado parte de la familiarización. Al comprobar mediante análisis de la varianza para medidas repetidas que no existieron diferencias significativas entre los tres test supramáximos (López Calbet y col. 1997b), los tres valores fueron promediados y los cálculos de efectuaron siempre con los valores medios obtenidos en cada sujeto para cada variable. La recta de economía se obtuvo por regresión lineal entre el VO₂ y la intensidad del esfuerzo. La relación entre las variables incluidas en los test supramáximos se determinó mediante el test de correlación de Pearson. Se aceptaron como significativas aquellas diferencias cuya

probabilidad de ser debidas al azar fue igual o inferior al 5 %. Se presentan los valores de las variables como medias \pm DE.

RESULTADOS

Los valores de DMOA obtenidos en este estudio fueron de 4730 ± 1120 ml eq. de O₂, es decir, 65.6 ± 14.7 ml eq. de O₂ • kg masa corporal⁻¹, oscilando entre un valor mínimo de 36.0 y un valor máximo de 91.3 ml eq. de O₂ • kg masa corporal⁻¹. Los valores alcanzados por el resto de variables medias en los tests supramáximos, así como las rectas de economía de pedaleo, la potencia desarrollada en el test de Wingate, y las variables antropométricas aparecen expuestos en la Tabla I. La relación VO₂/intensidad mostró un comportamiento lineal en todos los sujetos, siendo el coeficiente de correlación de Pearson entre VO₂ e intensidad, siempre $r > 0.99$ y $p < 0.05$. En consecuencia, el error estándar de la estimación del VO₂ a partir de la recta de economía fue siempre inferior a 100 ml de O₂, lo que representa un error inferior al 3 % en la determinación de la demanda por extrapolación.

Correlaciones entre las variables

El DMOA correlacionó con la concentración de lactato en sangre alcanzada al final del test de capacidad anaeróbica ($r=0.43$, $p<0.05$, $n=28$), con el trabajo realizado y con el VO₂ acumulado en el test de capacidad anaeróbica ($r=0.59$, $p<0.001$, $n=28$ y $r=0.56$, $p<0.01$, $n=29$, respectivamente). La lactatemia al final del test de capacidad anaeróbica correlacionó con trabajo realizado en el test de capacidad anaeróbica en valores absolutos ($r=0.49$, $p<0.01$, $n=27$) y con el trabajo dividido entre la masa muscular de las extremidades inferiores ($r=0.65$, $p<0.001$, $n=26$). Sin embargo, no se observaron correlaciones significativas entre la lactatemia máxima en los 5 primeros minutos de la recuperación y el trabajo, expresado ya sea en valores absolutos como referidos a la masa muscular de las piernas. Ambas determinaciones de lactato en sangre correlacionaron entre sí ($r=0.70$, $p<0.05$, $n=10$).

No se observaron correlaciones significativas entre el DMOA y la potencia máxima, ni tampoco entre el DMOA y la potencia media desarrolladas en el test Wingate, ya sea expresadas en valores absolutos o referidos a la masa muscular de las piernas. Tampoco correlacionó la lactatemia alcanzada al final del test de capacidad anaeróbica con la potencia máxima ni con la potencia media desarrollada en el test de Wingate.

DISCUSIÓN

La validez del DMOA como medida de la capacidad anaeróbica ha sido establecida a partir de la concordancia entre los valores de energía aportada por el metabolismo anaeróbico medidos como DMOA y los determinados a partir de medidas invasivas (Medbø y col. 1988; Saltin 1990; Bangsbo y col. 1990; Withers y col. 1991; Medbø y Tabata 1993). Las medidas invasivas se basan en establecer la contribución del metabolismo anaeróbico al gasto energético a partir del estudio de metabolitos musculares (lactato, creatina, nucleótidos, intermedios glucolíticos y consumo de glucógeno, principalmente), junto con la determinación del flujo de lactato a través de la pierna. Para medir los metabolitos musculares es necesario obtener una biopsia muscular y para poder calcular el flujo de lactato se precisa medir la diferencia arteriovenosa de lactato, para lo que hay que colocar sendos catéteres en la arteria y en la vena femoral y medir repetidamente el flujo sanguíneo a través de la pierna (Saltin 1990; Koskolou y col. 1997). Entre un 10 y un 30 % del lactato producido durante este tipo de esfuerzos pasa al torrente circulatorio durante el ejercicio (Saltin 1990).

La medición invasiva de la capacidad anaeróbica presenta importantes limitaciones, pues se basa en asumir que las piezas de biopsia son representativas de toda la masa muscular activa y que los músculos que intervienen en el esfuerzo participan en igual grado. Además, como no es posible determinar directamente cuál es la cantidad de masa muscular activada durante el esfuerzo, ésta tiene que ser estimada. Así, para los ejercicios en tapiz rodante y en cicloergómetro, se asume que participa una masa muscular equivalente al 25-30 % de la masa corporal. Evidentemente, estas cifras pueden variar de unos individuos a otros y probablemente no todos los músculos que intervienen en el esfuerzo son activados con igual intensidad. Otro problema que plantea el manejo de biopsias musculares es el tiempo que transcurre desde que se obtiene la pieza hasta que ésta es congelada. Aunque este intervalo puede ser muy reducido (5-10 segundos), durante este tiempo puede variar la concentración de metabolitos con una cinética muy rápida como el ATP o la fosfocreatina. A pesar de las dificultades señaladas, las biopsias musculares permiten la evaluación directa de la capacidad anaeróbica y constituyen el estándar frente al cual otras técnicas deben ser comparadas (Gastin 1994).

A partir del procesamiento de biopsias musculares Medbø y col (1988) han estimado que durante el ejercicio de alta intensidad se hidrolizan 4.5 mmol.kg masa corporal⁻¹ de enlaces fosfato de alta energía y que la producción total de lactato es de

8.5 mmol.kg masa corporal⁻¹. Estos valores convertidos en volúmenes equivalentes de O₂ representan una capacidad anaeróbica aláctica de 16 ml.kg⁻¹ y una capacidad anaeróbica láctica de 44 ml.kg⁻¹, equivalentes a 24 y 65 kJ respectivamente. Los valores reflejados corresponderían a un hombre no específicamente entrenado y de unos 70 kg de masa corporal. Estas cifras son superiores en los atletas que practican disciplinas en las que la capacidad anaeróbica interviene de forma decisiva (López Calbet 1993; Gastin 1994; Calbet y col. 1997).

Puesto que la validación invasiva del DMOA como medida de la capacidad anaeróbica no está exenta de problemas y presunciones, se ha estimado necesario comprobar la validez del DMOA a partir de otros indicadores (Green y Dawson 1993; Gastin 1994). Así, se ha argumentado como criterio de validez que el DMOA es superior en los deportistas que practican disciplinas que se caracterizan por esfuerzos sostenidos de alta intensidad, como por ejemplo los velocistas, los corredores de 400 m, los ciclistas de pista de velocidad, etc. (Medbø y Sejersted 1985; Medbø y col. 1988; Scott y col. 1991; Bangsbo y col. 1993; López Calbet 1993; Gastin y Lawson 1994; Pizza y col. 1996). Así mismo, cabe esperar que el DMOA correlacione con otros tests supuestamente válidos para evaluar las cualidades anaeróbicas como el test de Wingate. Sin embargo, los resultados obtenidos en este estudio, al igual que los comunicados por otros autores parecen indicar que el DMOA no correlaciona o lo hace débilmente con la potencia media desarrollada en el test de Wingate (Scott y col. 1991). Resultados similares se han obtenido cuando se han analizado las correlaciones entre el DMOA y la marca en carreras de 300 a 800 m. Por ejemplo, Scott y col. (1991) determinaron el DMOA en 4 corredores de fondo, 5 mediofondistas, 3 velocistas (corredores de 200 a 400 m) y 4 sujetos sedentarios. Estos autores observaron que el DMOA correlacionó en los 12 deportistas estudiados con el tiempo en 300 y 400 m. ($r=-0.69$ y $r=-0.57$, respectivamente). Ramsbottom y col. (1994) comunicaron que el DMOA correlacionó más intensamente con el rendimiento en las pruebas de carrera de 100 m ($r=-0.88$) y 400 m ($r=-0.82$), que con el rendimiento en la prueba de 800 m ($r=-0.61$), al estudiar una muestra de 14 sujetos. Weyand y col. (1994) observaron correlaciones similares entre el rendimiento en pista y el DMOA. Estos autores estudiaron una muestra integrada por 22 varones, de los que 9 eran velocistas y 13 corredores de fondo, y 19 mujeres, de las 7 eran velocistas y 12 corredoras de fondo. Consideraron como velocistas a los corredores especializados en distancias iguales o inferiores a los 800 m. Al considerar conjuntamente todos los sujetos observaron correlaciones entre el DMOA y la marca en 100 m (-0.66), 200 (-0.71), 400 m (-0.71), 800 m (-0.62), 1500 m (-0.52) y 5000 m (-0.40). El estudio de

Weyand y col. (1994) demostró que el DMOA puede ser utilizado para predecir el rendimiento en pruebas de velocidad y mediofondo, empeorando su valor predictivo para distancias superiores a los 400 m. Sin embargo, Olesen y col. (1994) no observaron ninguna correlación entre la marca en la carrera de 400 m y el DMOA, a pesar de haber incluido en la muestra estudiada 8 corredores de 400 y 800 m, junto a otros 6 corredores recreacionales.

En un estudio realizado recientemente en nuestro laboratorio, en el que participaron 19 estudiantes de Educación Física (9 varones y 10 mujeres) observamos que el DMOA medido en carrera correlaciona ($r=0.62$), con la potencia media desarrollada en un test consistente en efectuar el mayor número de saltos verticales posibles en 30 s manteniendo la verticalidad y las manos en las caderas, intentando evitar la flexión de las rodillas (Chavarren y col., datos no publicados). No obstante, en el mismo grupo de sujetos el DMOA medido en cicloergómetro no correlacionó con la potencia media desarrollada en el test de saltos repetidos. Esta discrepancia entre unos estudios y otros podría ser debidas a la especificidad del DMOA, por lo que es preciso obtener el DMOA con un patrón de movimiento similar al utilizado en el test de pista. Al respecto, recientemente observamos que el déficit de oxígeno obtenido en un test "all-out", es decir en el que se intenta desarrollar la máxima potencia posible desde el inicio del test hasta su finalización correlacionó con la potencia media en el test de Wingate de 30 y 45 s (Calbet y col. 1997).

Es interesante señalar que en este trabajo hemos constatado que el DMOA correlacionó, aunque muy débilmente, con la concentración de lactato en sangre al final del test de esfuerzo. Scott y col. (1991) obtuvieron correlaciones ligeramente mejores ($r=0.58$) entre la lactatemia alcanzada 5 min después de un esfuerzo en tapiz hasta el agotamiento (120 % VO_{2max}) y el DMOA, no obstante, ese índice de correlación no alcanzó significación estadística. En cambio, Ramsbottom y col. (1994) obtuvieron un índice de correlación de $r=0.80$ entre la lactatemia al final del test supramáximo y el DMOA, en 14 sujetos (10 hombres y 4 mujeres). La inclusión de hombres y mujeres en el grupo experimental pudo facilitar la obtención de una correlación más alta en el estudio de Ramsbottom y col. (1994), ya que las mujeres alcanzan lactatemias máximas y valores de DMOA más bajos que los hombres (Gastin 1994), con lo que el grupo es más heterogéneo y por lo tanto, es más fácil encontrar correlaciones. En otro estudio, Gastin y col. (1995) estudiaron la relación entre el DMOA y la lactatemia máxima postesfuerzo en 9 sujetos, durante tres esfuerzos supramáximos hasta el agotamiento: 2 de carga constante (110 y 125 % del VO_{2max})

y otro "all-out" (150 % del VO₂max) a 90 RPM en un ergómetro isocinético. Sólo observaron una relación significativa entre el pico de lactato en sangre y el DMOA tras el esfuerzo al 110 % del VO₂max ($r=0.64$). En cambio, los valores de lactatemia tras los otros dos esfuerzos supramáximos no correlacionaron con sus respectivos DMOAs. Pizza y col. (1996) tampoco obtuvieron correlaciones significativas entre la lactatemia máxima, determinada al acabar el test supramáximo de carga constante en cicloergómetro, y el DMOA.

Aunque la lactatemia máxima alcanzada al final de un esfuerzo de alta intensidad se ha utilizado como indicativa de la capacidad anaeróbica, existen varias razones por las que la lactatemia máxima no puede ser utilizada como una medida cuantitativa de la capacidad anaeróbica. Ello es debido a que la lactatemia no refleja necesariamente la producción de lactato, sino que depende de la velocidad con la que el lactato pasa a la sangre y de la velocidad con la que el lactato es eliminado de la sangre. Además entre 1/5 y 1/3 de la capacidad anaeróbica depende del sistema de los fosfágenos, por lo que no es valorada por las determinaciones de lactatemia (Saltin 1990; Spriet 1995). No sorprende pues, los índices de correlación entre el trabajo efectuado (o la marca en test de pista), y los valores máximos de concentración de lactato en sangre al finalizar un test que produzca el agotamiento en aproximadamente 2 min sean más bien bajos, tal y como hemos observado en este estudio (Scott y col. 1991; Weyand y col. 1994; para revisión ver Green y Dawson 1993). Por ejemplo, Weyand y col. (1994) observaron correlaciones ligeramente inferiores (-0.41 a -0.48) entre la lactatemia medida a los 3 min de finalizar un test supramáximo (120 % del VO₂max), y la marca en pruebas de 100, 200, 400 y 800 m.

Se ha comunicado que el DMOA depende, en parte, de la masa muscular activada (Medbø y col. 1988; Medbø y Tabata 1989; Saltin 1990; Bangsbo y col. 1990; Withers y col. 1993; Weyand y col. 1993; Pizza y col. 1996). Sin embargo, en este estudio no hemos encontrado ninguna correlación significativa entre el DMOA y la masa muscular de las extremidades inferiores, aunque sí que obtuvimos una correlación significativa entre la lactatemia máxima y la potencia media desarrollada por kg de masa muscular de las extremidades inferiores en el test supramáximo. En contraposición con nuestros resultados, Withers y col. (1993) observaron que el DMOA correlacionó con la masa corporal, con el volumen de la pierna y con la masa corporal libre de grasa de la pierna, determinados por antropometría ($r=0.66-0.77$) en 12 ciclistas y triatletas. Weyand y col. (1993) observaron una correlación muy buena entre el DMOA en cicloergómetro y el volumen de las extremidades inferiores ($r=0.94$), al estudiar un grupo de 20 sujetos (11 hombres y 9 mujeres), en los que

efectuaron mediciones de DMOA pedaleando con una sola pierna y pedaleando con las dos piernas. Pizza y col. (1996) sólo observaron una correlación significativa entre el DMOA y la masa muscular de las extremidades inferiores obtenida por antropometría en los 11 sujetos que entrenaban fuerza, mientras que no observaron correlaciones significativas entre DMOA y masa muscular en 12 sujetos no entrenados ni en 10 corredores de fondo. No obstante, cuando analizaron conjuntamente a los 33 sujetos incluidos en su estudio, obtuvieron una correlación significativa entre la masa muscular de las extremidades inferiores y el DMOA ($r=0.64$). No obstante, nuestro estudio es el primero en el que se mide la masa muscular de las extremidades inferiores, pues es los trabajos comentados anteriormente (Weyand y col. 1993; Withers y col. 1993; Pizza y col. 1996) se utilizó una estimación antropométrica del volumen de las extremidades inferiores, por lo que incluyen en la masa muscular el volumen ocupado por hueso. Estas diferencias procedimentales, junto con la mayor homogeneidad de nuestro grupo experimental, podrían explicar las discrepancias entre nuestros resultados y los citados anteriormente.

En resumen, el DMOA correlaciona débilmente con otras variables utilizadas en la valoración de la capacidad anaeróbica como la concentración de lactato en sangre al terminar un esfuerzo de alta intensidad hasta el agotamiento, mientras que no correlaciona con otras variables como la potencia máxima y la potencia media en el test de Wingate. Finalmente, no se ha podido demostrar ninguna relación entre el DMOA y la masa muscular de las extremidades inferiores. Aunque conceptualmente el DMOA es el mejor procedimiento no invasivo para medir la capacidad anaeróbica, la ausencia de correlaciones con otras variables que se han mostrado útiles en la evaluación de las cualidades anaeróbicas limita su interés desde el punto de vista práctico.

REFERENCIAS

- STRAND PO, SALTIN B (1961) Oxygen uptake during the first minutes of heavy muscular exercise. *J Appl Physiol* 16:971-976
- BANGSBO J, MICHALSIK L, PETERSEN A (1993) Accumulated oxygen deficit during intense exercise and muscle characteristics of elite athletes. *Int J Sports Med* 14:207-213

- BANGSBO J (1996) Oxygen deficit: A measure of the anaerobic energy production during intense exercise? *Can J Appl Physiol* 21:350-363
- CALBET JAL, CHAVARREN J, DORADO C (1997) Fractional use of anaerobic capacity during a 30 and a 45 s Wingate test. *Eur J Appl Physiol* 76:308-313.
- CHAVARREN CABRERO J (1996) *Efectos del entrenamiento de carrera y ciclismo sobre la condición física en sujetos activos*. Tesis Doctoral, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
- GASTIN PB (1994) Quantification of anaerobic capacity. *Scand J Med Sci Sports* 4:91-112
- GASTIN PB, Lawson DL (1994) Influence of training status on maximal accumulated oxygen deficit during all-out cycle exercise. *Eur J Appl Physiol* 69:321-330
- GREEN S (1994) A definition and systems view of anaerobic capacity. *Eur J Appl Physiol* 69:168-173
- GREEN S, DAWSON B (1993) Measurement of anaerobic capacities in humans. Definitions, limitations and unsolved problems. *Sports Med* 15:312-327
- HENSON LC, POOLE DC, WHIPP BJ (1989) Fitness as determinant of oxygen uptake response to constant-load exercise. *Eur J Appl Physiol* 59:21-28
- HERMANSEN L (1969) Anaerobic energy release. *Med Sci Sports* 1:32-38
- KARLSSON J, SALTIN B (1970) Lactate, ATP, and CP in working muscles during exhaustive exercise in man. *J Appl Physiol* 29:598-602
- KARLSSON J, SALTIN B (1971) Oxygen deficit and muscle metabolites in intermittent exercise. *Acta Physiol Scand* 82:115-122
- KOSKOLOU MD, ROACH RC, CALBET JAL, RÅDEGRAN G, SALTIN B (1997) Cardiovascular Responses to dynamic exercise with acute anemia in humans. *Am J Physiol* 42:H1787-H1793.
- KROGH A, LINDHARD J (1919/20) The changes in respiration at the transition from work to rest. *J Physiol* 53:431-437
- KUIPERS H, VERSTAPPEN FTJ, KEIZER HA, GEURTEN P, KRANENBURG G (1985) Variability of aerobic performance in the laboratory and its physiological correlates. *Int J Sports Med* 6:197-201

- LAKOMY H.K.A. (1986) Measurements of work and power output using friction-loaded cycle ergometers. *Ergonomics* 29:509-517
- LÓPEZ CALBET JA (1993) *Valoración Fisiológica de la Condición Física en Ciclistas Altamente entrenados*. Tesis Doctoral. Universidad de Barcelona.
- LÓPEZ CALBET JA, NAVARRO MA, BARBANY JR, GARCÍA MANSO J, BONNIN MR, VALERO J. (1993) Salivary steroid changes and physical performance in highly trained cyclists. *Int J Sports Med* 14: 111-117.
- LÓPEZ CALBET J.A., J CHAVARREN CABRERO, C. DORADO GARCÍA, H. CRUZ CABRERA, J.M. GARCÍA MANSO (1993). Fiabilidad del analizador de lactato YSI 1500 Sport, comparado con un metodo espectrofometrico. V *Congreso de la Federación Española de Medicina del Deporte*. Pamplona 1993. Comunicaciones, editado por la Federación Española de Medicina del Deporte (FEMEDE), Pamplona, pag: 133-134.
- LÓPEZ CALBET JA, JM GARCÍA MANSO, A PALOMINO MARTIN, J CHAVARREN CABRERO, JR BARBANY CAIRÓ (1995a). Variabilidad a corto plazo de la economía de pedaleo en sujetos no ciclistas. *Congreso Científico Olímpico - 1992*. Bioquímica, Fisiología del Ejercicio y Medicina del Deporte. Deporte y Documentación 24(IV). Instituto Andaluz del Deporte, Málaga, pag:253-260
- LÓPEZ CALBET JA, SAAVEDRA MILLÁN I, RODRÍGUEZ MEDINA J, ATSET TORMO R, ARTEAGA ORTIZ R (1995b). Reliability of measurement of maximal anaerobic power in active women. Abstracts. *VIIIth FIMS European Congress of Sports Medecine*. Granada, 23-27 Octubre de 1995, pag: 49.
- LÓPEZ CALBET JA, ARMENGOL RAMOS O, CHAVARREN CABRERO J, DORADO GARCÍA C (1997). Una ecuación antropométrica para la determinación del porcentaje de grasa corporal en varones jóvenes de la población canaria. *Med Clin (Barc)*: 108:207-213.
- CALBET JAL, DORADO GARCÍA C, FERRAGUT FIOL C, CHAVARREN CABRERO J (1998). Causas de error y variabilidad en la determinación del deficit máximo de oxígeno acumulado. *Archivos de Medicina del Deporte*. 15:105-114.

- MARGARIA R, EDWARDS HT, DILL DB (1933) The possible mechanisms of contracting and paying the oxygen debt and the role of lactic acid in muscular contraction. *Am J Physiol* 106:689-715
- MEDBØ JI (1996) Is the maximal accumulated oxygen deficit an adequate measure of the anaerobic capacity. *Can J Appl Physiol* 21:370-383
- MEDBØ JI, SEJERSTED OM (1985) Acid-base and electrolyte balance after exhausting exercise in endurance-trained and sprint-trained subjects. *Acta Physiol Scand* 125:97-109
- MEDBØ JI, MOHN AC, TABATA I, BAHR R, VAAGE O, SEJERSTED OM (1988) Anaerobic capacity determined by maximal accumulated O₂ deficit. *J Appl Physiol* 64:50-60
- MEDBØ JI, TABATA I (1989) Relative importance of aerobic and anaerobic energy release during short-lasting exhausting bicycle exercise. *J Appl Physiol* 67:1881-1886
- MEDBØ JI, TABATA I (1993) Anaerobic energy release in working muscle during 30 s to 3 min of exhausting bicycling. *J Appl Physiol* 75:1654-1660
- PATE RR, GOODYEAR L, DOVER V, DOROCIAC J, MCDANIEL J (1983) Maximal oxygen deficit: a test of anaerobic capacity. Abstract. *Med Sci Sports Exerc* 15:121-122
- PIZZA FX, NAGLIERI TA, HOLTZ RW, MITCHELL JB, STARLING RD, PHILLIPS MD, CAVENDER DL, BRAUN WA (1996) Maximal accumulated oxygen deficit of resistance-trained men. *Can J Appl Physiol* 21:391-402
- POOLE DC, BARSTOW TJ, GAESSER GA, WILLIS WT, WHIPP BJ (1994) VO₂ slow component: physiological and functional significance. *Med Sci Sports Exerc* 26:1354-1358
- SALTIN B (1990) *Anaerobic capacity: past, present and prospective*. En: Taylor AW, Gollnick PD, Green HJ, Ianuzzo CD, Noble EG, Métivier G, Sutton JR (eds) *Biochemistry of exercise*. Vol VII. Human Kinetics, Champaign, IL., pag: 387-412.
- VANDEWALLE H, PÉRÈS G, MONOD H (1987) Standard anaerobic exercise tests. *Sports Med* 4:268-289

- WEYAND PG, CURETON KJ, CONLEY DS, HIGBIE EJ (1993) Peak oxygen deficit during one- and two-legged cycling in men and women. *Med Sci Sports Exerc* 25:584-591
- WEYAND PG, CURETON KJ, CONLEY DS, SLINIGER MA, LIU YL (1994) Peak oxygen deficit predicts sprint and middle-distance track performance. *Med Sci Sports Exerc* 26:1174-1180
- WITHERS RT, SHERMAN WM, CLARK DG, ESSELBACH PC, NOLAN SR, MACKAY MH, BRINKMAN M (1991) Muscle metabolism during 30, 60 and 90 s of maximal cycling on air-braked ergometer. *Eur J Appl Physiol* 63:354-362
- WITHERS RT, PLOEG G VAN DER, FIN JP (1993) Oxygen deficits incurred during 45, 60, 75 and 90-s maximal cycling on an air-braked ergometer. *Eur J Appl Physiol* 67:185-191