8

La prueba de ejercicio cardiopulmonar en Neumología

F. Ortega Ruiz, P. Cejudo Ramos, E. Márquez Martín

INTRODUCCIÓN

La prueba de ejercicio cardiopulmonar permite el análisis integrado de la respuesta al ejercicio y evaluar la reserva funcional de los sistemas implicados en la misma. Es decir, nos va a dar una visión global de la respuesta del sujeto y nos va a permitir analizar, de forma diferenciada, los diferentes factores que inciden en la tolerancia al esfuerzo[1].

El desarrollo del ejercicio físico implica un aumento de la demanda celular de oxígeno que determina una rápida respuesta fisiológica de todas las funciones implicadas en el transporte de oxígeno desde la atmósfera a la mitocondria, con el objetivo de aumentar el aporte de oxígeno. De forma resumida, intervienen:

- Nivel pulmonar: con aumento de la ventilación e intercambio de gases.
- Nivel cardiocirculatorio: con aumento del débito cardiaco.
- Microcirculación del músculo esquelético: con aumento de la extracción de oxígeno y homogeneización de las relaciones entre perfusión y consumo de oxígeno.

Las características del perfil de la respuesta al ejercicio del paciente van a depender del tipo de enfermedad y severidad de la misma, y van a incidir fundamentalmente sobre estos tres grandes sistemas. La posibilidad de determinar de forma objetiva el grado de tolerancia al esfuerzo del paciente, la de poder detectar alteraciones funcionales no visibles en reposo e identificar el eslabón del sistema de aporte de oxígeno que está actuando de forma ineficaz durante el ejercicio, confieren al test de esfuerzo un gran potencial clínico[2].

ENERGÉTICA MUSCULAR

La energía necesaria para el desarrollo de actividad física sostenible durante un cierto periodo de tiempo se obtiene a través de la respiración mitocondrial. Durante la misma, mediante un metabolismo esencialmente aeróbico, el consumo de oxígeno necesario para la oxidación de diferentes sustratos metabólicos (ciclo de Krebs) da lugar a la síntesis de moléculas con alto contenido energético que se utilizan para el desarrollo de fuerza mecánica (contracción muscular). Durante el ejercicio intenso el organismo puede producir energía, de forma transitoria y menos eficiente, a través de la vía glucolítica, que constituye la fuente más importante de producción de ácido láctico.

La función más importante de las mitocondrias es, pues, obtener y conservar, bajo la forma de adenosín-trifosfato (ATP), la energía liberada por la oxidación enzimática de distintas moléculas nutritivas: glucosa, aminoácidos y ácidos grasos. Estas reacciones enzimáticas son secuenciales y se desarrollan en la membrana interna y matriz mitocondrial. El proceso en su conjunto recibe el nombre de fosforilización oxidativa y es altamente eficaz, ya que consigue 36 moléculas de ATP por cada molécula de glucosa metabolizada[3].

Los hidratos de carbono representan la forma de obtener energía más inmediata para la célula. Antes de ser utilizados por las mitocondrias, son previamente con-

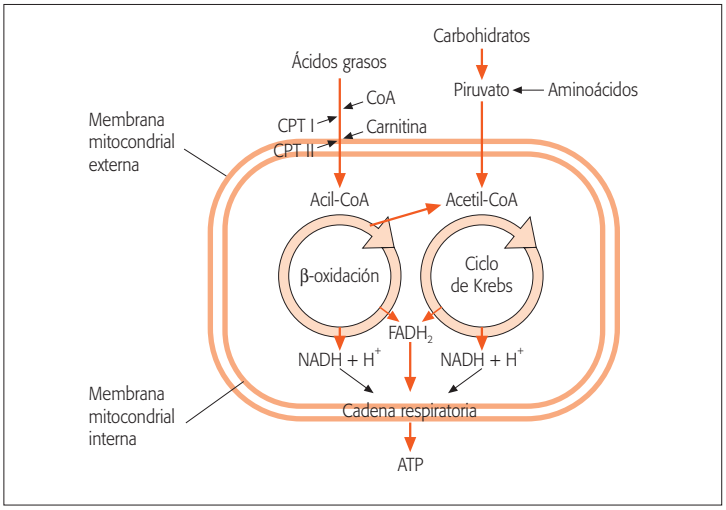

Figura 1. Esquema global de las reacciones mitocondriales que dan lugar a la formación de ATP a través de la fosforilización oxidativa.

vertidos en ácido pirúvico mediante el proceso denominado glucólisis, que tiene lugar en el citoplasma celular, de forma anaerobia. Los lípidos son, en primer lugar, metabolizados por el hígado y otros tejidos formando ácidos grasos mientras que las proteínas son hidrolizadas a aminoácidos. Piruvato, ácidos grasos y aminoácidos son entonces transportados activamente al interior de las mitocondrias por medio de enzimas translocasas.

La síntesis del ATP representa la culminación del metabolismo productor de energía en los organismos aeróbicos. El ATP obtenido es trasladado al citoplasma celular, donde será utilizado como fuente energética fundamental, degradándose a ADP y fósforo inorgánico (Pi). La tasa respiratoria (consumo de O_2) y, por tanto, la síntesis de ATP está ajustada a las necesidades de la célula y a las condiciones fisiológicas.

En resumen, la célula muscular dispone de tres fuentes energéticas cuya utilización varía en función de la actividad física desarrollada, aunque no es habitual estar abastecido únicamente por uno de ellos, puede prevalecer un sistema sobre los otros:

1. Sistema aeróbico u oxidativo

La resíntesis de ATP se realiza a partir de la fosforilación oxidativa. Tanto los hidratos de carbono, como las grasas y excepcionalmente las proteínas pueden ser utilizadas después de una serie de transformaciones en el ciclo de Krebs o ciclo de los ácidos tricarboxílicos (Fig. 1).

La principal función del ciclo de Krebs es la de extraer los hidrógenos contenidos inicialmente en las moléculas de glucosa ya transformada en acetil para poder oxidarlos en el proceso de la fosforilación oxidativa. Como ya hemos comentado, este proceso es capaz de sintetizar gran cantidad de moléculas de ATP. Por cada dos átomos de hidrógeno ionizados en la cadena de electrones se sintetizan 3 ATP, formándose un total de 36 ATP a través del proceso de la oxidación, que contrasta con los dos ATP que se forman en la glucólisis anaeróbica.

2. Sistema anaeróbico-aláctico o sistema de los fosfágenos

La resíntesis de ATP se realiza a partir de la fosfocreatinina. El ATP es la fuente de energía más rápida e inmediata. El metabolismo de los fosfágenos proporciona la energía necesaria para la contracción muscular al inicio de la actividad y durante ejercicios muy breves, explosivos y de elevada intensidad. Sin embargo, los almacenes de ATP en la célula son muy escasos, por lo que debe regenerarse continuamente, y eso se consigue fundamentalmente a través de la fosfocreatina. La transferencia de energía de la fosfocreatina al ADP para formar ATP es un proceso rápido (una única reacción catalizada por la creatín kinasa) y anaeróbico.

3. Sistema anaeróbico-láctico o glucólisis anaeróbica

La resíntesis de ATP se realiza mediante la transformación del glucógeno muscular en lactato. Solo los hidratos de carbono pueden metabolizarse sin la parti-

cipación directa del oxígeno, a través de la glucólisis. La transformación de glucosa en ácido pirúvico permite la fosforilación directa del ADP en ATP. Durante el catabolismo de una molécula de glucosa y su transformación en piruvato se forman 2 NADH. Si el piruvato y el NADH entran en la mitocondria puede continuar su degradación por glucólisis aeróbica, permitiendo conseguir más ATP. Pero si la actividad mitocondrial no es capaz de aceptar estos complejos reductores, se vuelven a oxidar en el citoplasma mediante una reacción catalizada por la lactato deshidrogenasa y por la cual el piruvato se reduce y se transforma en lactato[4].

Los diferentes sistemas energéticos no actúan de forma independiente. Los tres sistemas contribuyen a las necesidades energéticas totales del organismo. En los diferentes tipos de ejercicio predomina un sistema energético sobre los otros, y el músculo decide cuál utilizar en función de diversos factores, entre los que destaca la intensidad del ejercicio (dependiendo de la tasa a la que es necesario reponer el ATP).

VARIABLES DE RESPUESTA

Para cualquier individuo, las necesidades metabólicas específicas para un ejercicio determinado dependen de un gran número de variables. Una de ellas es el modo de contracción, es decir, si el ejercicio es dinámico o estático. Una consideración importante en el ejercicio estático es el grado de isquemia que pueda provocar al músculo. El aumento excesivo de la presión intramuscular durante el ejercicio estático de alta intensidad disminuye la presión de perfusión efectiva, limita el flujo de sangre al músculo y el suministro de O_2, aumentando de esta manera la dependencia del metabolismo anaerobio. Durante las contracciones isométricas en condiciones de isquemia total, la producción de lactato es responsable del 60% de la producción de ATP. Sin embargo, en el ejercicio dinámico a un 70% del consumo de oxígeno máximo (VO_2máx) la producción de lactato es responsable de un 2% de la resíntesis total de ATP[5].

La masa muscular activa también es importante, encontrándose en relación con una mayor respuesta cardiovascular, pulmonar y neuroendocrina para aumentar las demandas del metabolismo oxidativo. Existen amplias evidencias de que el gasto cardiaco es un factor limitante, sobre todo en los ejercicios en que intervienen grandes masas musculares durante 3 a 10 minutos. Se ha calculado que, según un modelo multifactorial derivado de la ecuación de la conductancia de O_2, el papel relativo del transporte de O_2 en la circulación como factor limitante es de 0,5, mientras que el papel de la ventilación, la transferencia de O_2 desde los capilares a la mitocondria y el consumo por esta última como factores limitantes son insignificantes[6].

Otras variables importantes son la intensidad y la duración del ejercicio, que influirán en la activación de los diferentes sistemas metabólicos musculares. En ejercicios de intensidad inferior al 50% del VO_2máx los sustratos oxidativos utilizados son los ácidos grasos plasmáticos (FFA) y la glucosa sanguínea, utilizándose el sistema aerobio. La fracción de FFA que interviene en este tipo de ejercicio aumenta con la duración del mismo, de manera que los sujetos normales pueden realizar potencialmente ejercicio de intensidad ligera a moderada durante muchas horas[7]. A medida que aumenta la intensidad del ejercicio, existe un aumento progresivo en la oxidación de los carbohidratos respecto de los FFA, siendo el glucógeno el combustible dominante en trabajos por encima del 50% del VO_2máx. La duración del ejercicio a intensidades por encima del 70-80% del VO_2máx está relacionada directamente con el contenido inicial de glucógeno muscular. El punto de fatiga se corresponde con la depleción total de glucógeno. La intensidad del ejercicio se expresa normalmente en términos absolutos, es decir, en términos de potencia desarrollada (vatios de trabajo externo conseguido o litros de oxígeno consumidos).

Por supuesto, el grado de entrenamiento será otro factor limitante y los sujetos entrenados alcanzan picos mayores de VO_2máx que los sedentarios[8], debido fundamentalmente a un aumento del gasto cardiaco y de la diferencia A-V de oxígeno.

Las variables de respuesta durante una prueba de ejercicio las podemos dividir en dos grandes grupos: generales y específicas[9].

Variables generales

- **Volumen corriente** (V_T): se mide en litros o mililitros. En las prueba de esfuerzo se mide como volumen espirado y es ligeramente superior al volumen inspirado. Este parámetro se ve afectado por el espacio muerto del aparato. Un patrón errático persistente suele ser manifestación de ansiedad y con frecuencia se asocia a hiperventilación.
- **Frecuencia respiratoria** (Fr): normalmente sube a 30-40 respiraciones por minuto y raramente

excede las 50 respiraciones por minuto en personas sanas. Frecuencias respiratorias mayores solo se observan en las enfermedades restrictivas o en la ansiedad.

- **Ventilación máxima** ($V_E$máx): se mide en L/min y se debe utilizar la misma técnica de promedio que con el VO_2máx. Se suele comparar con la ventilación voluntaria máxima (MVV) en 12-15 segundos, o estimada del FEV_1, habitualmente multiplicándolo por 35 o 40, aunque la estimación [20 x FEV_1 + 20 L/min] tiene mayor precisión.
- **Tensiones arteriales de gases arteriales** (PaO_2 y $PaCO_2$): la PaO_2 tiende a mantenerse constante o a aumentar durante el ejercicio por el aumento de la presión alveolar de O_2, al aumentar R, o por hiperventilación. La $PaCO_2$ es similar a la basal mientras no se produzca academia láctica, que suele compensarse con hiperventilación.
- **Diferencia alveolo-arterial de oxígeno** (A-aPO_2): es un índice de la eficiencia del intercambio de oxígeno. Su valor en reposo varía con la edad [(0,33 x años de edad) – 2 ± 5] y aumenta aproximadamente un 20% en el ejercicio máximo. No suele pasar en ejercicio de 30 mmHg salvo en atletas. Su aumento es característico de cardiopatías con *shunt* derecho-izquierdo o enfermedades pulmonares con marcada afectación vascular pulmonar (afectación del intersticio o propiamente vasculares). Se produce una disminución con el ejercicio en obesos, EPOC leve o pacientes con afectación de la pequeña vía aérea.
- **Relación espacio muerto-volumen corriente** (V_D/V_T): es un parámetro sensible pero inespecífico que se afecta en muchos procesos y con la taquipnea excesiva (superior a 50 respiraciones por minuto).
- **Lactato** (La) y **amonio** (NH_3): el lactato en reposo está entre 0,5 y 2,2 mmol/L y aumenta con el ejercicio hasta 4,5-10 mmol/L. Si no aumenta con el ejercicio, es indicativo de poco esfuerzo o enfermedad de McArdle. Su aumento excesivo asociado a un VO_2máx bajo sugiere enfermedad cardiovascular. El amonio superior a 120 mmol/L, sobre todo a potencias bajas, es sugestivo de miopatías metabólicas.
- Presión arterial sistémica, electrocardiograma y puntuación de síntomas (escala de Borg o escalas visuales analógicas).

Variables específicas

- **Consumo de oxígeno** (VO_2) y producción de carbónico (VCO_2): el VO_2máx se define como la máxima capacidad aeróbica y es el mayor valor de VO_2 que se alcanza en una prueba progresiva limitada por síntomas. Para su medición se recomienda utilizar un método de promedio, bien por tiempo o por respiraciones. Se expresa en L/min, por kilo de peso o, preferiblemente, comparado con valores de referencia. Se considera que el VO_2máx está disminuido si está por debajo del 80% del valor teórico y es severo si está por debajo del 50%.
- **Equivalentes respiratorios para el oxígeno** (V_E/VO_2) y **para el carbónico** (V_E/VCO_2): son una medida indirecta de la eficiencia respiratoria. Su aumento se produce en los problemas cardiacos o respiratorios. Valores de V_E/VCO_2 superiores a 35 indican mal pronóstico en la insuficiencia cardiaca crónica y en la hipertensión pulmonar primaria.
- **Cociente de intercambio respiratorio** ($R=VCO_2/VO_2$): en reposo suele estar entre 0,75 y 0,9, para superar 1 cuando se alcanza y rebasa el umbral de ácido láctico.
- **Relación VO_2/potencia**: es una relación constante y oscila entre 8 y 12 ml/min/W.
- **Umbral de ácido láctico** (θ_L): corresponde al nivel de esfuerzo por encima del cual se produce un incremento sostenido en la concentración de ácido láctico en sangre arterial. Por debajo del umbral el ejercicio se puede tolerar durante periodos prolongados, por encima, en más o menos tiempo, aparece fatiga. Si el umbral es inferior al 40% del VO_2máx, suele deberse a una enfermedad significativa, valores entre el 40-50% pueden observarse con problemas cardiacos o musculares incipientes o por desentrenamiento. Las causas potenciales del umbral láctico pueden ser:
  a) *Limitación de la disponibilidad de oxígeno*. Si el oxígeno no es usado como oxidante terminal en la cadena de transporte de electrones se produce lactato para mantener la producción de ATP. Sin embargo, no es lógico suponer que el aumento del lactato se debe simplemente a la ausencia de disponibilidad del oxígeno. Es más correcto suponer que el aumento del lactato se debe a que la tasa de producción corporal excede la tasa de utilización del mismo. El

argumento de que la limitación de oxígeno es responsable del comienzo de la acidosis láctica durante el ejercicio progresivo es apoyado por la evidencia de que, si se añade oxígeno en la inspiración de sujetos que están en ejercicio, se retrasa el comienzo de la acidosis láctica. Por otro lado, la concentración de lactato en una tasa alta de trabajo está reducida cuando los sujetos hacen ejercicio en situación de hiperoxia. Al contrario, la reducción aguda de la PaO_2 inspirada reduce el umbral láctico, y la concentración de láctico sanguíneo es más alta a una determinada cantidad de trabajo por encima del umbral. El hecho de que cualquier medio de inducción de hipoxia tisular (hipóxico, anémico, inactividad o histotóxico) produce este efecto parece proporcionar una evidencia incontrovertible de que el umbral láctico es un mecanismo oxígeno-dependiente[10].

b) *Limitación de la tasa enzimática.* El entrenamiento de resistencia aumenta numerosos factores implicados en la transferencia de energía oxidativa, por ejemplo, el número de mitocondrias, algunas enzimas del ciclo de Krebs (como la succinato dehidrogenasa), las enzimas de la cadena respiratoria mitocondrial (como la citocromo oxidasa) y la mioglobina (la cual facilita la difusión del oxígeno). Aunque el aumento en la capacidad oxidativa del músculo de los sujetos entrenados es sugestivo de un papel en la anaerobiosis de la capacidad enzimática oxidativa, no ha sido demostrado que las enzimas mitocondriales por ellas mismas se hagan limitadoras de la tasa en el umbral láctico en el sujeto sano. La demostración de que el aumento de la PaO_2 inspirada aumenta el umbral láctico parece invalidar la hipótesis de que las limitaciones de la actividad enzimática oxidativa en presencia de PO_2 local adecuada sea responsable del aumento de lactato.

c) *Los tipos de fibras que componen el músculo*. El número de mitocondrias y el potencial oxidativo de las fibras tipo I tiende a ser significativamente mayor que aquellas de las fibras tipo II. En consecuencia, la producción de lactato es más probable si el aumento de la potencia es producido por fibras de tipo II que por el uso de fibras tipo I[11].

- **Frecuencia cardiaca** (FC): la frecuencia cardiaca máxima (FCmáx) se evalúa comparándola con los valores teóricos (220 – años de edad ± 10 L/m). Cuando la limitación al ejercicio no sea de origen cardiovascular, la FCmáx estará a más de 15 pulsaciones por minuto del valor teórico. La pendiente FC/VO_2 sigue una relación lineal.
- **Pulso de oxígeno** (VO_2/FC): es una medida de la eficiencia cardiovascular. Se observan valores bajos en pacientes con problemas cardiacos, en la anemia, carboxihemoglobinemia o hipoxemia y en algunas miopatías. El pulso de oxígeno está elevado en sujetos entrenados y con la toma de betabloqueantes.

RESPUESTA FISIOLÓGICA AL EJERCICIO.

Durante el ejercicio, los músculos esqueléticos son capaces de convertir la energía almacenada en trabajo. La viabilidad de todo el sistema requiere una interacción especializada entre los pulmones, corazón, vasos sanguíneos y los componentes de la musculatura periférica, incluidas las mitocondrias. El fallo en alguno de estos componentes afectaría a la utilización del oxígeno para la respiración celular[12].

La respuesta ventilatoria no limita la capacidad de esfuerzo en el sujeto sano. El aumento de la ventilación minuto (V_E) se hace a expensas del volumen circulante (V_T) hasta alcanzar una meseta (50% de la capacidad vital). Luego es la frecuencia respiratoria (Fr) la que aumenta progresivamente. La ventilación minuto no llega a sobrepasar el 60% de su máxima capacidad ventilatoria (MVV). El sujeto normal dispone de una gran reserva respiratoria que hace que su capacidad de esfuerzo no esté limitada por la ventilación. El volumen residual puede sufrir pequeñas elevaciones, aunque la FRC y TLC permanecen sin cambios.

La capacidad inspiratoria (CI) es la cantidad de aire que puede ser inspirado después de una espiración máxima. La relación V_T/CI refleja la proporción del potencial volumen inspiratorio que se está utilizando en una respiración. Se considera que un individuo tiene limitaciones inspiratorias si V_T alcanza CI particularmente a intensidades de trabajo submáximas.

La relación V_D/V_T es la proporción del volumen corriente que constituye el espacio muerto y es un índice de la relativa ineficiencia del intercambio de gases pulmonar para eliminar el CO_2; expresa la cantidad de ventilación que no participa en el intercambio

gaseoso alveolar. En sujetos normales, la relación entre el espacio muerto y el volumen corriente disminuye desde el reposo hasta un nivel moderado de ejercicio. La relación aumenta durante el ejercicio en la insuficiencia cardiaca, en enfermedad pulmonar circulatoria y en enfermedad pulmonar obstructiva y restrictiva.

La relación T_i/T_{tot} indica la fracción inspiratoria del ciclo respiratorio. Normalmente aumenta de un valor de cerca de 0,4 a uno superior a 0,8 desde el reposo al ejercicio máximo, indicando una mayor contribución del T_E sobre la frecuencia respiratoria. La relación T_i/T_{tot} puede ser bastante baja en pacientes con enfermedad pulmonar obstructiva crónica.

Con el ejercicio se produce un incremento del gasto cardiaco (Q_T) de 4 a 6 veces. Se consigue por un incremento de tres veces la frecuencia cardiaca (FC) junto con un incremento de 1,5 a 2 veces del volumen de eyección (VS). Hay un descenso de las resistencias vasculares sistémicas, pero dado que el aumento del Q_T es superior, el resultado final es un incremento en la presión sanguínea sistémica. Lo normal es una subida de la presión sistólica entre 50 y 70 mmHg y una ligera bajada de la presión diastólica. Una presión sistólica superior a 200 mmHg es un factor de riesgo de desarrollo de hipertensión arterial. Una caída de presión sistólica superior a 20 mmHg durante la prueba indica disfunción cardiaca. Se incrementa entre 2 a 3 veces la diferencia arteriovenosa de oxígeno ($D(a\text{-}v)O_2$). La diferencia máxima promedio es de 160 m/L lo que indica que los músculos en actividad pueden extraer casi completamente el oxígeno de la sangre arterial.

La FC se incrementa linealmente en función de la carga de ejercicio hasta alcanzar los valores máximos predichos. Es más alta para cada nivel de carga de ejercicio en pacientes con patología cardiaca, reflejando el incremento de la dependencia de la FC para el incremento del gasto cardiaco, al estar disminuido el volumen sistólico; excepto en pacientes con incompetencia cronotrópica, con bloqueos cardiacos, algunas miocardiopatías, o bien en tratamiento con beta-bloqueantes. La FC aumenta linealmente en función del VO_2 hasta alcanzar los valores máximos predichos de ambas variables. La pendiente de la relación es más abrupta y a menudo no lineal en pacientes con enfermedades cardiacas, incluyendo también a aquellos pacientes con patologías pulmonares de etiología vascular. La FC máxima en los pacientes con limitaciones ventilatorias es habitualmente inferior a los valores predichos para sujetos normales, ya que los pacientes alcanzan el punto de limitación ventilatoria antes de que su sistema cardiovascular haya alcanzado el máximo.

La frecuencia cardiaca de reserva es la diferencia entre la frecuencia cardiaca máxima teórica predicha para la edad y la FC alcanzada durante un ejercicio máximo. Es útil para calibrar el estrés del sistema cardiovascular durante el ejercicio. Normalmente es pequeña; sin embargo, puede estar aumentada en: claudicación vascular periférica, coronariopatía con angina que limita el ejercicio, enfermedad del nodo sinusal, bloqueo beta-adrenérgico, enfermedades pulmonares que limitan el ejercicio, insuficiente motivación y enfermedades musculares.

El factor limitante del ejercicio en el individuo sano es precisamente el factor hemodinámico y en concreto la incapacidad miocárdica de aumentar el gasto cardiaco en la proporción adecuada para poder satisfacer las necesidades tisulares de oxígeno.

Los mecanismos de control respiratorio ajustan la ventilación para mantener la PaO_2 y $PaCO_2$ sin cambios (a altas cargas, esta tiende a descender). La elevación de la $PaCO_2$ (o la ausencia de hiperventilación cuando hay academia láctica) pueden verse en pacientes con EPOC moderada o severa y en los trastornos de la respuesta de los centros respiratorios. También puede ocurrir cuando se parte de una hiperventilación basal por ansiedad o dolor.

En ejercicios progresivos, el consumo de oxígeno (VO_2) y la producción de carbónico (VCO_2) aumentan proporcionalmente con la ventilación. El cociente entre los dos parámetros es el llamado cociente respiratorio ($R= VCO_2/VO_2$). El consumo de oxígeno máximo (VO_2máx) es la cantidad de oxígeno consumida a esfuerzos máximos y supone una medida de la capacidad de transportar oxígeno a los tejidos.

Existe una relación lineal entre la intensidad del esfuerzo realizado (medida en vatios) y el consumo de oxígeno hasta alcanzar el VO_2máx, que es un valor que se mantiene constante (*plateau*) a pesar de aumentar la carga muscular (Fig. 2). Estos esfuerzos que se sitúan en la zona *plateau* pueden ser sostenidos durante muy poco tiempo[13].

Como ya hemos comentado, el umbral anaeróbico o láctico (θ_L) es el nivel de ejercicio en el que la producción energética aeróbica es suplementada por mecanismos anaeróbicos y se refleja por un incremento de lactato en sangre. La medida del umbral

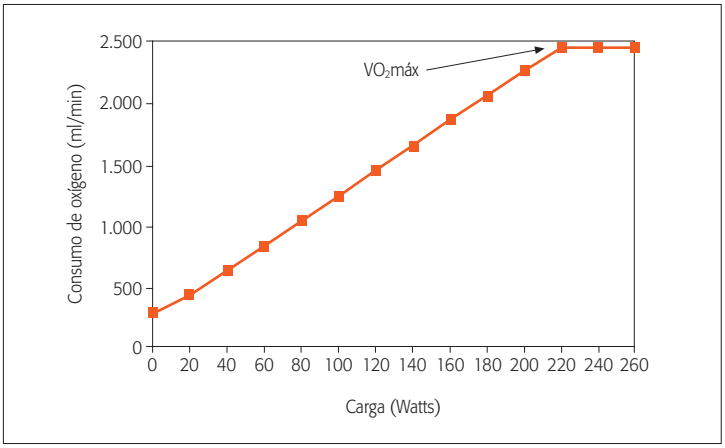

Figura 2. Relación entre intensidad del esfuerzo realizado (Watts) y consumo de oxígeno (VO_2). Existe una relación lineal entre ambas variables hasta alcanzar el valor de VO_2máx, definido como aquel valor de VO_2 que se mantiene constante (*plateau*) a pesar de aumentar la carga muscular.

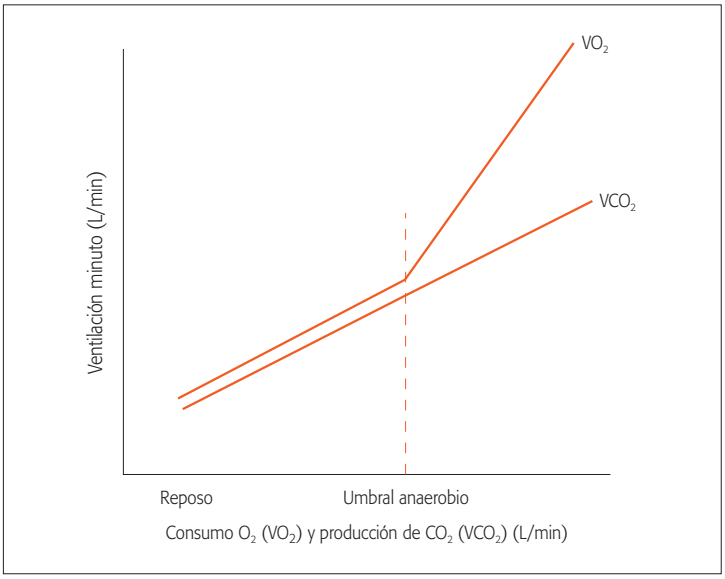

Figura 3. Relación entre la ventilación minuto (V_E), producción de CO_2 (VCO_2) y consumo de oxígeno (VO_2). La relación entre las dos primeras variables (V_E/VCO_2) se mantiene constante al aumentar el esfuerzo físico, mientras que la relación V_E/VO_2 es bifásica. El punto de inflexión corresponde al denominado umbral anaerobio ventilatorio.

puede ser directa con análisis en muestras sanguíneas del nivel del ácido láctico. Esta determinación invasiva es el patrón oro para la medida del aumento brusco del láctico sanguíneo. Sin embargo, son más habituales las medidas indirectas. El llamado método convencional, umbral ventilatorio o umbral del equivalente ventilatorio se basa en que el volumen minuto aumenta proporcionalmente al VCO_2 y desproporcionadamente al VO_2; el umbral coincide con el punto de mantenimiento del equivalente ventilatorio para el CO_2 (V_E/VCO_2) con aumento del equivalente para el oxígeno (V_E/VO_2). En este punto donde la VCO_2 comienza a producirse en exceso respecto del VO_2, la R (cociente respiratorio) es aproximadamente de 1 o superior (Fig. 3).

El segundo método indirecto es el de la V-*slope* o umbral de intercambio gaseoso. Se basa en la relación directa del VCO_2 y el VO_2. Antes del θ_L, existe una relación lineal ente la producción de CO_2 y el consumo de oxígeno, mientras que en el θ_L, el CO_2 producido está en relación con la producción de lactato y no con el VO_2. Así, la pendiente cambia y se hace más elevada. El VO_2 en el cual ocurre el cambio en la pendiente se corresponde con el θ_L (Fig. 4).

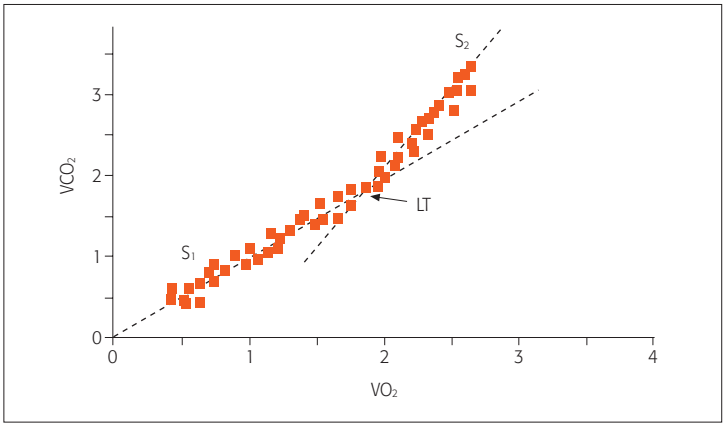

Figura 4. Método de "V-*slope*" (VCO_2 frente a VO_2 durante un ejercicio incremental). Las líneas discontinuas reflejan las respuestas de la pendiente inferior (S_1) y superior (S_2) que se interceptan en el umbral láctico (LT).

El umbral anaeróbico ocurre entre el 50-60% del VO_2máx y se encuentra descendido en las enfermedades cardiacas; y en la EPOC o es normal o no se llega a alcanzar debido a su reducida capacidad de esfuerzo[14].

Se puede obtener una valoración indirecta del volumen de eyección durante el ejercicio a través de la medición del pulso de oxígeno (VO_2/FC) mediante la modificación de la ecuación de Fick:

$VO_2 = Q_T \times D(a\text{-}v)\ O_2$

$VO_2 = VS \times FC \times D(a\text{-}v)O_2$

$VO_2/FC = VS \times D(a\text{-}v)O_2$

El pulso de oxígeno se define como la cantidad de oxígeno removida por cada latido y volumen sistólico cardiaco y su reducción suele indicar una disminución del volumen de eyección. Al igual que ocurre en las enfermedades cardiacas, los valores del pulso de oxígeno en la EPOC están reducidos pero, a diferencia de aquellas, mantiene una pendiente similar a la del sujeto normal (en la patología cardiaca se alcanza un *plateau*)[15].

ESTRATEGIAS DE INTERPRETACIÓN

Quién interprete la prueba debería saber los motivos para hacerla y disponer de información sobre la historia clínica, de datos de función respiratoria y de un ECG y analítica elemental. Se debe comprobar en cada prueba que la calibración y las variables antropométricas son correctas. Las estrategias de interpretación deben tomarse como una guía y no como algo taxativo. No hay que olvidar que en muchas ocasiones coexisten varias enfermedades y los patrones de respuestas no son puros de una única enfermedad.

En la enfermedad pulmonar obstructiva crónica existe una limitación ventilatoria al ejercicio que se caracteriza por un consumo de oxígeno máximo reducido, amplia reserva cardiaca y disminución en la reserva ventilatoria, umbral anaeróbico normal, bajo o indeterminado, pulso de oxígeno proporcionalmente reducido con el VO_2máx y una respuesta variable de la PaO_2.

En la enfermedad pulmonar intersticial el patrón es parecido, con un descenso en el consumo de oxígeno máximo, amplia reserva cardiaca y reducida reserva ventilatoria, pero a expensas de una enorme frecuencia respiratoria (Fr > 60 r.p.m.) y aumento del espacio muerto, umbral anaeróbico normal o bajo, pulso de oxígeno proporcionalmente reducido con el VO_2máx y, característicamente, una caída de la PaO_2 con importantes desaturaciones.

En las enfermedades cardiacas se produce un descenso en el consumo máximo de oxígeno con una disminución en la reserva cardiaca con normalidad en la reserva ventilatoria, umbral anaeróbico bajo (< 40% del VO_2máx), pulso de oxígeno reducido (*plateau*) y normal PaO_2.

En las enfermedades vasculares pulmonares el descenso en el consumo máximo de oxígeno se acompaña de una normal reserva cardiaca y ventilatoria, umbral anaeróbico reducido (< 40% del VO_2máx), pulso de oxígeno disminuido (*plateau*) y descenso en la PaO_2 con desaturaciones.

El paciente con falta de motivación o simulador, el descenso en el VO_2máx se acompaña con una amplia reserva cardiaca y ventilatoria, umbral anaeróbico indeterminado y un aumento en la ventilación minuto y en

TABLA 1. Contraindicaciones para la práctica de una prueba de ejercicio cardiopulmonar.

Absolutas.
• Infarto agudo de miocardio reciente (3-5 días). • Angina inestable. • Arritmias incontroladas que produzcan síntomas o compromiso hemodinámico. • Endocarditis activa. • Miocarditis o pericarditis aguda. • Estenosis aórtica severa sintomática. • Fallo cardiaco incontrolado. • Embolismo pulmonar agudo o infarto pulmonar. • Insuficiencia renal aguda. • Tirotoxicosis. • Trombosis de las extremidades inferiores.
Relativas
• Estenosis de la arteria coronaria izquierda o su equivalente. • Estenosis valvular cardiaca moderada. • Alteraciones electrolíticas. • Hipertensión arterial no tratada (sistólica > 200 mmHg, diastólica > 120 mmHg. • Hipertensión pulmonar. • Taquiarritmias o bradiarritmias. • Miocardiopatía hipertrófica • Impedimento mental que imposibilite la cooperación. • Bloqueo auriculoventricular severo.

TABLA 2. Circunstancias para detener la prueba de ejercicio cardiopulmonar.

- Dolor torácico sugestivo de angor pectoris.
- Mareo, vértigo, confusión mental o falta de coordinación, náuseas.
- Aparición brusca de palidez extrema, sudoración fría o cianosis.
- Disnea severa. El paciente no puede continuar o porque pide parar.
- Fallo del equipo (ECG, TA).
- Cambios ECG sugestivos de isquemia miocárdica.
- Extrasistolia compleja o taquicardia ventricular (3 extrasístoles ventriculares seguidos).
- Bloqueo aurículo-ventricular de 2º o 3er grado.
- Taquicardia supraventricular paroxística o fibrilación auricular rápida sintomática.
- Aparición de bloqueo de rama intraventricular.
- Toda disminución del valor basal de la TA.
- Disminución > 20 mmHg en TA sistólica tras el aumento esperado con el ejercicio.
- Aumento excesivo de la TA: TA sistólica > 250 mmHg o TA diastólica > 140 mmHg.

los equivalentes ventilatorios para el oxígeno y carbónico ya en reposo, y no se producen desaturaciones.

METODOLOGÍA Y TIPOS DE PRUEBAS

Los equipos deben ser calibrados diariamente y antes de cada prueba. Suele bastar con una calibración en dos puntos: aire (O_2 20,93% y CO_2 0,04%) y un gas con 15-16% de O_2 y 5% de CO_2. Para la calibración del medidor de flujo se usan jeringas de 3-4 litros calibradas. Las pruebas pueden ser realizadas por un técnico y un médico familiarizados con la fisiología del ejercicio y con su interpretación.

Las pruebas de esfuerzo son bastante seguras, con un riesgo de 1-2 muertes por 100.000 pruebas en pacientes con enfermedades crónicas, aunque es más elevada en las pruebas de estrés coronario (2 de cada 10.000 pruebas). No se deben realizar en aquellas situaciones en que estén contraindicadas (Tabla 1). Es recomendable la disponibilidad de medios para la reanimación avanzada o de un procedimiento definido de acceso rápido a la misma[16].

El paciente debe ser informado sobre las características de la prueba, los beneficios y riesgos, y las posibles alternativas. De igual manera, debe conocer los síntomas que ha de transmitirnos para interrumpir la prueba (Tabla 2). Es necesario un consentimiento por escrito.

Las pruebas de ejercicio realizadas en laboratorio (incremental o de carga constante) son útiles e insustituibles para el análisis de problemas específicos. Sin embargo, los requerimientos propios de un laboratorio de ejercicio son relativamente complejos. Las pruebas de campo presentan menores requerimientos tecnológicos y no son solo complementarias para su utilización en la práctica clínica habitual, sino que, en ocasiones, deben considerarse como alternativas a las pruebas de laboratorio.

Pruebas de laboratorio

Los tipos de ergómetros comúnmente empleados son el tapiz rodante y el cicloergómetro. El VO_2 pico en el tapiz es del 5-10% más alto que el obtenido con el cicloergómetro, y se trata de un ejercicio con el que los sujetos están más familiarizados que con el pedaleo. La mayor desventaja del tapiz es la dificultad de controlar la intensidad del trabajo realizado (de forma indirecta por la velocidad e inclinación del tapiz). El cicloergómetro es más barato, ocupa menos espacio y produce menos artefactos en el registro del ECG y toma de tensión arterial. Además, cuantifica de forma adecuada la intensidad del ejer-

cicio (W) y, por tanto, analiza la relación entre VO_2 y carga de trabajo.

La conexión entre el aparato y el paciente se puede hacer a través de mascarillas o boquillas. Las mascarillas son más confortables pero su principal inconveniente es que tienen un espacio muerto mayor. Conviene disponer de varias mascarillas para adaptarlas a los distintos tamaños de cara. Las boquillas tienen un espacio muerto menor y son menos propensas a sufrir fugas inadvertidas, pero producen mucha salivación. Si se usan boquillas se debe poner una pinza nasal.

Los protocolos de realización del ejercicio los podemos agrupar en dos grandes grupos:

- Incrementos progresivos de carga hasta llegar al límite de la tolerancia determinada por síntomas. Es el protocolo habitualmente utilizado y en cada escalón se aumenta entre 10 y 20 vatios según la tolerancia del enfermo (más afectados, subidas más suaves). Tras mediciones en reposo (2-3 min) se realizan 3 min de pedaleo sin carga, para después iniciar el incremento de potencia al ritmo decidido. Una vez alcanzado el máximo, se debe continuar midiendo todas las variables durante los tres minutos iniciales del periodo de recuperación.
- Protocolos a cargas constantes. Cuando un sujeto efectúa un ejercicio a carga constante suele alcanzar un consumo de oxígeno estable (estado estacionario) y puede prologar la duración del ejercicio. Los protocolos de intensidad alta (más del 70% de la potencia máxima) se utilizan fundamentalmente para ver las respuestas al tratamiento (como el entrenamiento al ejercicio) y evaluar la necesidad de oxígeno. También se utiliza en la detección del asma inducida por el ejercicio. Los protocolos de intensidad baja (por debajo del umbral láctico) son útiles también para valorar la cinética del intercambio de gases respiratorios. Así, por ejemplo, determinadas situaciones como la EPOC cursan con un enlentecimiento de la cinética del oxígeno durante el ejercicio a una carga submáxima fija, y que se puede corregir con diversos tratamientos. También se utilizan para mediciones fisiológicas que requieren estabilidad o un cierto tiempo para llevarlas a cabo: curvas flujo-volumen en ejercicio, hemodinámicas, hiperinsuflación dinámica, gasto cardiaco por *rebreathing*.

Existen valores teóricos para ambos sexos a través de ecuaciones de predicción. Los más usados son los de Hansen y los de Jones, teniendo este último la ventaja de ofrecer teóricos tanto para el consumo de oxígeno como para los vatios[17,18].

Como ya hemos comentado, los procedimientos de calibración se deben realizar en la mañana de la prueba y antes de cada prueba a cada paciente. Las instrucciones para la preparación del paciente deben incluir: llevar ropa cómoda y zapatos adecuados para el ejercicio, no fumar ni consumir alcohol por lo menos 4 horas antes de la prueba, no deben hacer comidas pesadas en las 2 horas previas, no hacer actividades físicas intensas antes de la prueba y no debe suspender ninguna medicación.

Entre los factores que pueden influir en los resultados de la prueba se encuentra el esfuerzo realizado por el paciente. Debemos animar a los pacientes para que hagan un esfuerzo máximo, y es recomendable estandarizar los mensajes de estímulo, animándole a mantener el ritmo en cada cambio de potencia o si apreciamos que disminuye la frecuencia del pedaleo. Alguna medicación, como los betabloqueadores y antagonistas de los canales del calcio, pueden afectar la respuesta de la frecuencia cardiaca. Otros, como los broncodilatadores y betabloqueadores, pueden afectar la respuesta ventilatoria.

Pruebas de campo

Las pruebas simples de ejercicio, como ya hemos comentado, presentan menos requerimientos tecnológicos que las hacen practicables fuera del laboratorio de función pulmonar y con un equipo y personal técnico no tan especializado. Es posible que sean incluso más relevantes respecto a las actividades de la vida diaria (que no suponen esfuerzos máximos) y que solo exigen caminar, actividad a la que todos están acostumbrados[19].

Los protocolos simples de ejercicio más populares son:

- La prueba de marcha durante un periodo controlado (6 o 12 minutos).
- La prueba de lanzadera (*Shuttle walking test*).
- La prueba de subir escaleras (PSE).

Las pruebas de marcha han demostrado:

- Ser predictores de supervivencia, independientemente de otras variables (EPOC, candidatos a trasplante).
- Se correlacionan con una mayor tasa de ingresos hospitalarios debido a exacerbaciones.

- Evolución postoperatoria en pacientes candidatos a cirugía de reducción de volumen. Identifica a pacientes con evolución desfavorable con más alta mortalidad y hospitalización de larga duración. Además, el incremento de la tolerancia al ejercicio es más duradero que los cambios observados en el FEV_1.
- Predice mortalidad y morbilidad en pacientes con disfunción ventricular izquierda.
- Buena sensibilidad a los efectos terapéuticos (entrenamiento, fármacos, trasplante).

Prueba de los 6 minutos

La prueba de los 6 minutos (PM6) se realiza en un corredor de distancia conocida en donde el paciente trata de recorrer la máxima distancia que pueda en ese intervalo de tiempo, pudiendo realizar incluso cambios de ritmo, paradas, etc. y se controla al final la distancia total recorrida expresada en metros.

Es importante la longitud del pasillo, siendo aconsejable utilizar un corredor de al menos 30 m, sin declive alguno. Así se evitan los giros y el consiguiente enlentecimiento de la velocidad. Insistir en que la velocidad de paso la marca el paciente y que el técnico no debe caminar con el paciente.

Un gran problema de esta prueba es la adecuada estandarización ya que el resultado dependerá de la forma en que se dirija la prueba. Es muy influenciable, entonces, por el incentivo que se le haga al paciente. El uso de frases que sirvan de incentivo a intervalos regulares lleva a un incremento de la distancia recorrida. Deben utilizarse frases estándar a intervalos regulares (cada 60 seg). El incentivo verbal durante la prueba se realizará cada minuto, utilizando solo las frases siguientes y evitando estímulos gestuales[20].

- Primer minuto: "lo está haciendo muy bien, faltan 5 minutos para finalizar".
- Segundo minuto: "perfecto, continúe así, faltan 4 minutos".
- Tercer minuto: "está en la mitad del tiempo de la prueba, lo está haciendo muy bien".
- Cuarto minuto: "perfecto, continúe así, faltan 2 minutos".
- Quinto minuto: "lo está haciendo muy bien, falta 1 minuto para acabar la prueba".
- Quince segundos antes de terminar la prueba se recuerda al paciente que se deberá detener con la indicación de "pare".
- Sexto minuto: "pare, la prueba ha finalizado".

Para la realización de la prueba es imprescindible contar con un equipo muy sencillo: cronómetro, un pasillo de longitud de más de 30 metros, dos conos para marcar los extremos del recorrido, pulsioxímetro, escala de Borg, manómetro de tensión y oxígeno transportable (si se precisa). El paciente realizará la prueba con vestimenta y calzado cómodos. No debe realizar ejercicio intenso en las dos horas previas a la prueba y pueden utilizar las ayudas habituales para la marcha (muleta, bastón, etc.). No es recomendable el ayuno antes de la prueba aunque la comida debe ser ligera.

Es muy poco peligrosa, aunque se recomienda ejecutarla en un lugar que permita la intervención de emergencia. Los pacientes que estén cumpliendo tratamiento con oxígeno deben realizar la prueba con oxígeno[21]. La prueba se utiliza, además, para titular oxígeno a pacientes con dispositivos portátiles. En este caso, el paciente debe andar portando el sistema de suministro de oxígeno y un pulsioxímetro.

Los parámetros que se pueden controlar son: frecuencia cardiaca, tensión arterial, grado de disnea (escala de Borg), saturación de oxigeno y metros recorridos.

Un inconveniente de la prueba es su reproductibilidad. Debido a un efecto aprendizaje, es aconsejable realizar al menos dos pruebas y tomar como válida la de mayor distancia caminada.

Otro concepto importante es saber diferenciar la significación estadística *versus* significación clínica (al analizar, por ejemplo, los efectos de un tratamiento). La diferencia mínima clínicamente significativa para un paciente es de 54 metros, aunque para pacientes con EPOC severa se considera clínicamente significativo por encima de 26 ± 2 m.

Existen varios valores de referencia, incluido población española, así como ecuaciones de predicción para hombres y mujeres[22]. Hay que tener en cuenta, sin embargo, que algunos estudios han observado una variabilidad de hasta el 30% en función de la ecuación escogida[23].

Prueba de la lanzadera

La prueba de lanzadera (SWT) es una prueba de tipo incremental, progresiva hasta máxima capacidad del individuo. En la prueba se le indica la velocidad de marcha al paciente a lo largo de un corredor (10 m) mediante una señal sonora y la velocidad se incrementa cada minuto hasta 12 niveles de velocidad.

Debe comunicarse una explicación estandarizada de las instrucciones a seguir por el paciente: "camine a un ritmo adecuado, tratando de volver en la dirección contraria cuando oiga la señal. Debe continuar caminando hasta que no pueda continuar por asfixia o ahogo o se sienta incapaz de mantener el ritmo establecido". Una señal simple indica que el paciente debe encontrarse en un extremo, y una triple, un aumento de la velocidad de paso cada minuto. No se dará ningún incentivo verbal durante la prueba. Solo en el cambio de nivel se recordará que debe aumentar ligeramente la velocidad de marcha. La prueba se termina si para el paciente (por síntomas) o si no es capaz de alcanzar el extremo del corredor en el tiempo de que dispone (no puede mantener la velocidad). Se contabiliza el número total de metros recorridos y se registrará el último nivel completado. Se controla la tensión arterial, frecuencia cardiaca, saturación y disnea mediante escala de Borg[19,21].

A diferencia con el de 6 minutos, tiene un alto grado de estandarización y una buena reproducibilidad. Según nuestra propia experiencia, es suficiente con una prueba (aunque se puede hacer una prueba previa de práctica). Esto permite una buena comparación de los resultados obtenidos en diferentes centros sanitarios.

También tenemos valores de referencias y la mínima significación clínica está establecida en 47,5 metros, aunque se obtienen beneficios adicionales al superar los 78,7 metros[24].

Se ha descrito una variante de este test para la evaluación de resistencia o *endurance* (ESWT) utilizado fundamentalmente para comprobar la eficacia de distintos tratamientos, aunque también se ha utilizado como protocolo de entrenamiento al ejercicio. El ESWT es fácil de realizar, aceptable para todos los pacientes, y muestra una buena reproductibilidad después de un paseo de práctica. La prueba pone de manifiesto una mejoría importante después de un programa de entrenamiento al ejercicio y se muestra más sensible al cambio que la prueba de campo de capacidad máxima[25].

Prueba de subir escaleras

La prueba de subir escaleras (PSE) se basa en la necesidad de que el paciente alcance un cierto nivel de estrés metabólico con el esfuerzo que reproduzca. El grado de actividad alcanzada o, más exactamente, la potencia alcanzada en el desarrollo de la prueba, nos proporciona una estimación de la capacidad aérobica del paciente. Se ha propuesto fundamentalmente para la evaluación funcional preoperatoria en cirugía de resección pulmonar. Ha sido criticada sobre todo por su falta de estandarización y de seguridad para el paciente. Para incrementar la estandarización de la prueba, es necesario realizarla en una única escalera donde se haya medido de forma rigurosa la altura de los escalones y se conozca exactamente en qué puntos se producen los eventos clave: la altura a la que finaliza el esfuerzo y la altura de los 22 m considerados como punto de corte parra la clasificación del riesgo quirúrgico del paciente. Estos 22 m corresponden aproximadamente a unos 7 pisos, aunque pueden variar según las características arquitectónicas del edificio. Recientemente se han propuesto alternativas a la prueba estándar para facilitar su realización y mejorar su reproductividad[26].

En resumen, aunque ya hemos citado alguno de sus inconvenientes, las pruebas de marcha están muy extendidas y posiblemente esta difusión sea una de sus mayores ventajas. Pueden aportar información valiosa en la evaluación clínica de los pacientes y se caracterizan por su simplicidad y bajo coste.

INDICACIONES Y APLICACIÓN CLÍNICA DE LAS PRUEBAS DE ESFUERZO

Un requisito previo indispensable para su indicación es la identificación adecuada del problema clínico y determinar los objetivos específicos de la misma. Puede ofrecer información sobre: evolución del grado de disfunción, monitorización o seguimiento de la presencia de enfermedad, determinación del pronóstico y, en algunas ocasiones, como prueba diagnóstica[1,2].

Las principales indicaciones son:

1ª Evaluación de los factores limitantes de la tolerancia del ejercicio. Disnea de origen desconocido

Permite una mejor correlación con el estado sintomático y funcional del paciente. Se indica para:

- Examinar los posibles mecanismos que contribuyen a la limitación de la tolerancia del ejercicio o son responsables de la disnea.
- Cuando la causa de la disnea permanece sin aclarar tras la realización de las pruebas funcionales en reposo.

- La intensidad de la disnea es desproporcionada con los resultados de las otras pruebas de función pulmonar realizadas. Es de especial interés en aquellos en los que exista una disociación de las manifestaciones clínicas y las pruebas de función pulmonar en reposo.
- Coexisten varias afecciones, en particular enfermedad cardiaca y respiratoria, y sea conveniente aclarar la contribución de cada una de ellas a la sintomatología del paciente.
- Se sospeche que el desacondicionamiento físico (sedentarismo) o falta de motivación (factores psicológicos o simulación) puedan ser la causa de la limitación de la tolerancia del ejercicio.

2ª Evaluación preoperatoria del riesgo quirúrgico

En pacientes con moderado o severo riesgo para la resección pulmonar.

Según las guías actuales, al realizar una evaluación preoperatoria de resección pulmonar un FEV1 y DLCO previsto (ppoFEV_1 y ppoDLCO) entre el 60 y el 30% obligaría a la realización de una prueba de esfuerzo de baja tecnología, recomendándose un SWT o una PSE. Si el primero está por debajo de 400 m o el segundo es inferior a 22 m, debemos realizar una prueba de esfuerzo máxima y medir directamente el VO_2máx. Esta prueba se recomienda también si existe riesgo cardiovascular o si el ppoFEV_1 y ppoDLCO están por debajo del 30%. Si el paciente es capaz de superar un VO_2máx de 20 ml/kg/min, será considerado como de bajo riesgo, entre 10-20 ml/kg/min como de riesgo moderado y por debajo de 10 ml/kg/min como de alto riesgo[27].

También se ha utilizado en la valoración de la resección de volumen pulmonar en la EPOC. Distintos estudios han establecido que la cirugía de reducción de volumen pulmonar mejora la supervivencia en algunos pacientes: enfisema de lóbulos superiores y una capacidad de ejercicio baja que identifica como: < 25 W en la mujer y < 40 W en el hombre.

También en relación con la cirugía de reducción de volumen, se ha comunicado que una distancia en la prueba de los 6 minutos por debajo de los 200 m se relaciona con una alta mortalidad a los 6 meses, con una especificidad del 84%. De igual manera, una distancia inferior a los 150 m en el SWT predice una elevada mortalidad perioperatoria.

3ª Evaluación de la disfunción en enfermedades pulmonares crónicas

Con la prueba de esfuerzo podemos realizar una evaluación pronóstica y cuantificación exacta del nivel de afectación en distintas situaciones. Esta valoración se extiende desde el sujeto sano a una gran variedad de patologías crónicas.

La tolerancia al ejercicio es un reconocido predictor de mortalidad en sujetos sanos.

Este efecto se extiende desde el adulto joven hasta el anciano y afecta a mortalidad tanto de patología cardiovascular como no cardiovascular. El aumento de mortalidad es más acentuado si no se logra un consumo de oxígeno de 27,6 ml/kg/min o está descendido en más de un 20% del teórico que le corresponde. Este aumento de mortalidad está inversamente relacionado con el VO_2máx, a menor capacidad de esfuerzo mayor mortalidad. Este parámetro es un factor predictor de mortalidad con una potencia superior a otros factores de riesgo conocidos como la HTA, la obesidad o la diabetes en personas sin otras patologías.

La prueba de esfuerzo también es útil como predictor de mortalidad en distintas patologías:

a) Enfermedad pulmonar obstructiva crónica

Nos da una evaluación más exacta del grado de disfunción que presenta el paciente.

Diversos trabajos han descrito cómo el pico de consumo de oxígeno era el parámetro funcional principal como factor pronóstico de supervivencia a los 5 años, mejor incluso que el FEV_1 o la edad. Se ha confirmado el valor pronóstico del VO_2máx, comunicándose una mortalidad a los 5 años del 62% en aquellos sujetos con EPOC y VO_2 pico menor a 10 ml/min/kg. También se han descrito otros parámetros de esfuerzo aún mejores como la PaO_2 *slope* (relación entre tensión de oxígeno y consumo de oxígeno) que está asociada, por debajo de ciertos niveles, con una mortalidad superior al 80%.

También las pruebas de marcha se han mostrado útiles para predecir la mortalidad en pacientes con EPOC. Esta predicción está inversamente relacionada con la distancia paseada, de tal forma que se ha demostrado cómo la pérdida durante un año en la distancia recorrida en el test de 6 minutos predice una alta mortalidad y, en menor medida, mayor riesgo de hospitalización. En concreto, una reducción de 30

metros en la distancia recorrida está asociada con un claro incremento con el riesgo de muerte al año siguiente, y, al contrario, por cada 100 pies (30,48 m) de incremento en el desarrollo del ejercicio, se estima un incremento en la supervivencia del 11%.

Dada la importancia de este parámetro, la distancia paseada en la prueba de los 6 minutos está integrada dentro del índice BODE, que como se sabe tiene un elevado factor pronostico de mortalidad en los pacientes con EPOC.

b) Neumopatías intersticiales

En estos pacientes, la prueba puede ser particularmente útil para detectar anormalidades cuando las medidas de función pulmonar en reposo resultan normales.

Se ha encontrado que diferentes parámetros de esfuerzo pueden ser predictores de supervivencia, siendo quizás el más sensible la PaO_2 *slope*. En pacientes con fibrosis pulmonar idiopática un umbral de consumo de oxígeno máximo inferior a 8,3 ml/kg/min añade una información pronóstica, estando especialmente incrementado el riesgo de muerte.

De igual manera, una desaturación por debajo del 88% durante la prueba de 6 minutos es un poderoso factor pronóstico de mortalidad en pacientes con neumonía intersticial usual. La mortalidad a los 4 años era del 65% frente al 31% en los pacientes que no presentaban dicha desaturación. En pacientes con fibrosis pulmonar idiopática se ha descrito que una distancia en el test de 6 minutos menor de 207 metros tiene una mortalidad del 50% a los 6 meses, y era el más potente predictor de mortalidad de las pruebas funcionales.

c) Enfermedad pulmonar vascular (obstructiva) crónica

Aunque inicialmente la prueba de esfuerzo fue considerada como peligrosa en la hipertensión pulmonar primaria, actualmente se ha visto que permite definir la severidad de la enfermedad, su pronóstico y la respuesta a ciertas intervenciones.

En la hipertensión pulmonar primaria presenta una buena correlación con las variables hemodinámicas medidas en reposo y son de ayuda a la hora de determinar la severidad y la respuesta a la terapéutica. En estos pacientes, un VO_2máx inferior a 10,4 ml/min/kg presentaban un 50% de riesgo de muerte a 1 año y 85% a los 2 años, mientras que los pacientes con consumos de oxígeno superiores el riesgo de muerte a un año era del 10% y a los 2 años del 30%.

Con respecto a la prueba de los 6 minutos, la tasa de supervivencia a 20 meses fue del 20% en el grupo que consigue menos de 332 m, mientras que la tasa de supervivencia fue mayor del 90% en los que logran más distancia. La hipoxemia provocada por el ejercicio durante la prueba de 6 minutos ha mostrado también tener un valor pronóstico significativo de mortalidad. En concreto, se ha encontrado un incremento del 26% de riesgo de muerte por cada porcentaje de caída en la saturación durante la prueba.

d) Fibrosis quística

En pacientes diagnosticados de fibrosis quística un consumo de oxígeno pico superior al 82% del teórico, está asociado con una supervivencia del 83%, mientras que la mortalidad se incrementa con el deterioro de la capacidad de esfuerzo, con una supervivencia del 51% con consumo de oxígeno pico entre el 59-81% y del 28% con consumo de oxígeno inferior al 58%. El VO_2máx es una variable independiente en el aumento de mortalidad y después de ajustar por diferentes factores de riesgo, el paciente con fibrosis quística con alta capacidad de esfuerzo tiene menos riesgo, hasta 3 veces menos, comparados con los que tienen baja capacidad. Este parámetro se muestra como el mejor factor pronóstico de mortalidad detrás de la colonización por pseudomonas.

e) Insuficiencia cardiaca crónica

Se ha demostrado consistentemente que el consumo de oxígeno pico tiene una importancia pronostica en individuos con insuficiencia cardiaca crónica.

Un consumo de oxígeno superior a 14 ml/kg/min se asocia a una supervivencia a un año del 94% y a dos años del 84%, mientras que los pacientes con el consumo de oxígeno pico inferior a 14 ml/kg/min tienen tasas de supervivencia a uno y dos años de 47% y 32%, respectivamente.

Recientemente se ha desarrollado un gran interés por el uso de la pendiente de la relación entre la ventilación minuto y la producción de anhídrido carbónico (equivalente ventilatorio para el carbónico), en la evaluación pronostica de los sujetos con insuficiencia cardiaca. Un aumento de este parámetro, sin enfermedad pulmonar concomitante, refleja normalmente un deterioro de la difusión de gas pulmonar o el desarrollo

de hipertensión pulmonar durante el ejercicio. Una pendiente de la relación superior a 34 es un factor pronóstico de mortalidad a un año significativamente mejor que el consumo de oxígeno pico, así como de ingresos hospitalarios. Esta capacidad de predicción aumenta aún más cuando sumamos ambos factores.

El test de 6 minutos se muestra como un potente factor pronóstico en pacientes con insuficiencia cardiaca. Una distancia de menos de 300 metros se asocia con una menor supervivencia libre de eventos.

El poder de predicción del SWT en los pacientes con fallo cardiaco parece ser mucho mejor que la del test de 6 minutos. En concreto, una distancia paseada en el SWT inferior a 450 metros identifica un grupo de pacientes con alto riesgo de sufrir eventos cardiacos mayores.

4ª Desencadenamiento de un evento fisiológico con valor diagnóstico

De todos es conocida la utilidad de la prueba de esfuerzo para el diagnóstico de diferentes alteraciones cardiológicas. Sin embargo, como método diagnóstico de enfermedad coronaria la prueba tiene una sensibilidad del 68% y una especificidad del 77% en el diagnóstico de cardiopatía isquémica, muy por debajo de otras pruebas, como la imagen de talio, la ecocardiografía de estrés o la PET.

La prueba es útil para el diagnóstico del broncoespasmo inducido por el ejercicio.

La prueba es positiva en el 70-80% de los pacientes con clínica de asma. La información disponible sugiere que una prueba de esfuerzo positiva es más específica para identificar asma que los medios químicos, pero poco sensible para identificar hiperreactividad leve. Con este fin puede ser útil como:

- Método diagnóstico: poco utilizado frente a los métodos farmacológicos (metacolina, histamina). Al ser un desencadenante natural, simple y reproducible, es un método seguro en niños y adultos jóvenes.
- Método diagnóstico de elección: cuando sea la única manifestación de la enfermedad.
- Control de la respuesta a fármacos: eficacia y grado de protección obtenido con nuevos fármacos.

5ª Valoración del impacto de una intervención terapéutica

La prueba se utiliza de forma habitual para comprobar la efectividad de los distintos tratamientos en controlar la intolerancia al esfuerzo o para explicar su mecanismo de acción.

Así, puede ser capaz de poner en evidencia, cuando otras pruebas ya no lo son, por ejemplo, que la cirugía de reducción de volumen sigue siendo eficaz a los dos años de mantener una mejor ventilación o un menor espacio muerto frente a los que han realizado solo tratamiento médico habitual. Estos efectos difícilmente podrían ser detectados con otras pruebas en reposo.

Además, la prueba es especialmente útil para la indicación de oxigenoterapia solo durante el esfuerzo, con sistemas portátiles. En estos pacientes la utilización de la oxigenoterapia podría, entre otras cosas, mejorar la sintomatología y aumentar la capacidad de esfuerzo. Una saturación durante el ejercicio inferior al 88% o una caída superior al 4% se consideran clínicamente significativos, limitando la tolerancia al ejercicio y pueden suponer un riesgo potencial. La intensidad de la desaturación durante el ejercicio no se puede prever de las pruebas funcionales en reposo. Aunque la desaturación puede aparecer con cualquier tipo de ejercicio, las pruebas de marcha pueden ser más eficaces para producir desaturación que la prueba en cicloergómetro. Existe un grupo de pacientes que no sufren desaturaciones con el ejercicio. Otro grupo presentan desaturaciones con los dos tipos de pruebas. Pero hay un tercer grupo, de hasta el 28% de pacientes, que solo desaturan con el test de 6 minutos.

6ª Planificación y evaluación de los programas de rehabilitación física

Se utiliza en la valoración inicial del paciente, en la planificación del programa de entrenamiento más adecuado y en la evaluación de los resultados.

Aunque no existe un consenso general respecto a la intensidad del entrenamiento, una estrategia razonable es que se realice al menos a intensidad cercana al umbral láctico para conseguir un adecuado efecto entrenamiento.

7ª Medición objetiva y evaluación de la incapacidad laboral

La realización de la prueba de ejercicio parece ofrecer una valoración más objetiva de la capacidad para desarrollar un trabajo que las pruebas de función pulmonar en reposo.

Se utiliza fundamentalmente en casos de disociación entre la severidad de la sintomatología y la poca magnitud de la alteración de la función pulmonar en reposo.

Se considera a un paciente portador de una severa incapacidad cuando el VO_2máx es inferior a 15 ml/kg/min o al 60% de sus teóricos[28].

8ª Trasplante pulmonar y cardiopulmonar

La prueba de esfuerzo se podría utilizar en la indicación y evaluación tanto del trasplante cardiaco como del pulmonar.

Ya hemos visto anteriormente la validez de la prueba como factor pronóstico de mortalidad en pacientes con fallo cardiaco crónico. En base a ello se han establecido unos límites de parámetros de esfuerzo para poder indicar el trasplante cardiaco: niveles de consumo de oxígeno pico por debajo de 14 ml/kg/min o el equivalente ventilatorio para el carbónico superior a 34. Este nivel sería equivalente en las pruebas de marcha a 300 metros en el test de 6 minutos y 450 metros en el SWT.

Por desgracia, no existen unos límites tan precisos para el trasplante pulmonar, aunque se han barajado cifras parecidas. Hemos de recordar el índice BODE, donde está integrado el resultado del test de 6 minutos, que se está utilizando para indicar el trasplante en la EPOC en pacientes con puntuaciones superiores a 7.

En el caso de la fibrosis quística, se ha recomendado la reserva respiratoria a nivel del umbral láctico para indicar el trasplante pulmonar. Se ha observado que en pacientes con fibrosis quística en lista de espera para trasplante, un valor superior al 0.70 de este índice es altamente predictivo de mortalidad. Este parámetro tiene el mayor poder de predicción de mortalidad que el resto de pruebas funcionales y el uso de esta medida puede facilitar la priorización en la lista de trasplante, teniendo en cuenta el pobre poder discriminatorio del FEV_1 solo.

Hay que indicar que en los receptores del trasplante pulmonar, pese a la mejoría de la capacidad de esfuerzo durante el primer año del postoperatorio, el VO_2máx permanece reducido al 40-60% de sus valores teóricos.

BIBLIOGRAFÍA

1. Grupo de trabajo de la SEPAR. Recomendaciones SEPAR nº 26: Normativa sobre la prueba de ejercicio cardiopulmonar. Barcelona: Ediciones Doyma; 1999.
2. E.R.S. Clinical exercise testing with reference to lung diseases: indications, standardization and interpretation strategies. Eu Respir J. 1997; 10: 2662-89.
3. López J, Núñez MJ, Fernández A. Fisiología básica del ejercicio. En: Pino JM, García F, eds. Estudio de la función respiratoria. Pruebas de esfuerzo, 1ª ed. Sanitaria 2000. Gráficas ROAL; 2007. p. 7-50.
4. Ortega F. Respuesta al ejercicio. En: Martín P, Ramos G, Sanchis J, eds. Medicina Respiratoria, 2ª ed. Madrid: Grupo Aula Médica; 2006. p. 61-71.
5. Prampero PE. An analysis of the factors limiting maximal oxygen consumption in healthy subjects. Chest. 1992; 101: 188s-91s.
6. O´Neill AV, Johson DC. Transition from exercise to rest. Ventilatory and arterial blood gas responses. Chest. 1991; 99: 1145-50.
7. O´Kroy J, Loy R, Coast JR. Pulmonary function changes following exercise. Med Sci Sports Exerc. 1992; 24: 1359-64.
8. Casaburi R. Physiologic responses to training. Clin Chest Med. 1994; 15: 215-27.
9. Puente L. Valoración clínica de la respuesta al ejercicio. En: Martín P, Ramos G, Sanchis J, eds. Medicina Respiratoria, 2ª ed. Madrid: Grupo Aula Médica; 2006. p. 211-26.
10. Yoshida T, Chida M, Ichioka M, et al. Efecct of hypoxia on lactate variables during exercise. J Human Ergol. 1987; 16: 157.
11. Brooks GA. Lactate production under fully aerobic conditions: The lactate shuttle during rest and exercise. Fed Proc. 1986; 45: 2924.
12. Joint RL, Findley TW, Boda W, Daum MC. Therapeutic Exercise. En: DeLisa JA, ed. Rehabilitation Medicine. Principles and Practice. 2nd Ed. Philadelphia: JB Lippincott; 1993. p. 526-54.
13. Wasserman K, Hansen JE, Sue DY, Whipp BJ, Casaburi R. Principles of exercise testing and interpretation, 2nd ed. Filadelfia: Lea and Febiger; 1994.
14. Neder JA, Nery LE, Castelo A, Andreoni S, Lenario MC, Sachs A, et al. Prediction of metabolic and cardiopulmonary response to maximum cycle ergometry: a randomised study. Eur Respir J. 1999; 14: 1304-13.
15. Weisman IM, Zeballos RJ. Clinical exercise testing. Clin Clin Chest Med. 2001; 22: 679-701.
16. Puente L, Martínez Y. Pruebas de ejercicio. Pruebas máximas limitadas por síntomas. En: Burgos F, Casan P, eds. Manual SEPAR de procedimientos. Procedimientos de evaluación de la función pulmonar (II). Barcelona: SEPAR; 2004. p. 64-99.
17. Hansen JE, Sue DY, Wasserman K. Predicted values for clinical exercise testing. Am Rev Respir Dis. 1984; 129: S49-S50.
18. Jones NL, Makrides L, Hitchcock C, Chypchar T, McCartney N. Normal standards for an incremental progressive cycle ergometer test. Am Rev Respir Dis. 1985; 131: 700-8.

19. Montemayor T, Ortega F, Sánchez Riera H. Valoración de la capacidad de esfuerzo en la EPOC. Revisión crítica de las pruebas de marcha. Arch Bronconeumol. 1999; 35 (Supl. 3): 34-9.
20. ATS statement: guidelines for the six-minute walk test. Am J Respir Crit Care Med. 2002; 166: 111-7.
21. Vilaró J. Pruebas de marcha de 6 minutos. Pruebas máximas limitadas por síntomas. En: Burgos F, Casan P, eds. Manual SEPAR de procedimientos. Procedimientos de evaluación de la función pulmonar (II). Barcelona: SEPAR; 2004. p. 100-13.
22. Casanova C, Celli BR, Barria P, Casas A, Cote C, de Torres JP, et al; Six Minute Walk Distance Project (ALAT). The 6-min walk distance in healthy subjects: reference standards from seven countries. Eur Respir J. 2011; 37: 150-6.
23. Troosters T, Vilaró J, Ravinovich R, et al. Physiological responses to the 6-min walk test in patients with chronic obstructive pulmonary disease. Eur Respir J. 2002; 20: 564-9.
24. Singh SJ, Jones PW, Evans R, Morgan MDL. Minimun clinically important improvement for the incremental shuttle walking test. Thorax. 2008; 63: 775-7.
25. Revill SM, Morgan MDL, Singh SJ, Williams J, Hardman AE. The endurance shuttle walk: a new field test for the assessment of endurance capacity in chronic obstructive pulmonary disease. Thorax. 1999; 54: 213-22.
26. Novoa NM, Rodríguez M, Gómez MT, Jiménez MF, Varela G. La prueba de escaleras limitada por altura podría sustituir a la prueba estándar en la evaluación funcional previa a la resección pulmonar. Estudio piloto. Arch Bronconeumol. 2015; 51: 268-72.
27. Brunelli A, Kim AW, Berger KI, Addrizzo-Harris DJ. Physiologic evaluation of the patient with lung cancer being considered for resectional surgery. Diagnosis and management of lung cancer, 3rd ed: American College of Chest Physicians Evidence-Based Clinical Practice Guidelines. Chest. 2013; 143(Suppl): e166S-e190S
28. Ortega F, Montemayor T, Sánchez A, Cabello F, Castillo J. Role of cardiopulmonary exercise testing and the criteria used to determine disability in patients with severe chronic obstructive pulmonary disease. Am J Respir Crit Care Med. 1994; 150: 747-51.