

Pruebas de ejercicio cardiopulmonar

Grupo de Trabajo de la SEPAR*

Introducción

Las pruebas de ejercicio cardiopulmonar (PECP) permiten el análisis integrado de la respuesta al ejercicio y evalúan la reserva funcional de los sistemas implicados en la misma. Asimismo, determinan el grado de limitación de la tolerancia al ejercicio. Las pruebas de ejercicio cardiopulmonar resultan especialmente adecuadas para la evaluación de aquellas situaciones en que la disnea no tiene un reflejo claro en las pruebas de función pulmonar efectuadas en condiciones de reposo. El interés actual por las pruebas de ejercicio cardiopulmonar viene determinado por la conjunción de factores de naturaleza diversa, como su aplicabilidad en el área clínica, la no invasividad y el hecho de que aportan información que no puede obtenerse a partir de otras pruebas. Todo ello les otorga un gran potencial de futuro. Durante los últimos años se ha alcanzado un cierto consenso, o al menos un menor grado de controversia, en la interpretación de aspectos básicos de la fisiología del ejercicio que, sin duda, determinaron un cierto bloqueo de la aplicación clínica de las PECP. Constituyen un buen ejemplo de ello las polémicas sobre el papel del transporte de O₂ en la limitación de la tolerancia del ejercicio o la interpretación de los mecanismos fisiológicos subyacentes en el fenómeno del umbral láctico (antes llamado umbral anaerobio). No menos importante ha sido el desarrollo tecnológico de los ordenadores, los analizadores de gases espirados, el desarrollo de polímeros absorbentes de humedad, etc., que, en conjunto, han determinado avances notables en la fiabilidad de las PECP y han facilitado enormemente la interpretación de los resultados. La idoneidad de las PECP para estable-

cer la indicación de trasplante cardíaco, o para estimar el pronóstico en determinadas enfermedades como la fibrosis quística, han aumentado las expectativas sobre el papel de estas pruebas en la clínica. Actualmente, las PECP pueden ser consideradas claves en el laboratorio de función pulmonar. Asimismo, las nuevas concepciones en lo que respecta a las PECP deberán facilitar una colaboración fructífera de los neumólogos con otros médicos especialistas.

Este documento pretende desarrollar una concepción moderna de las PECP teniendo como perspectiva su utilidad en el ámbito neumológico. Las indicaciones de las pruebas de ejercicio cardiopulmonar (tabla I) nos ofrecen una descripción de las áreas de utilización potencial de este tipo de pruebas en nuestra especialidad. El documento, que representa el consenso alcanzado por los miembros del grupo de trabajo, pretende ofrecer un ba-

TABLA I
Indicaciones de las pruebas de ejercicio cardiopulmonar con referencia a la enfermedad pulmonar

- | |
|--|
| I. Evaluación de la limitación a la tolerancia del ejercicio y potenciales factores limitantes |
| I.1. Identificación de la limitación a la tolerancia del ejercicio, discriminando entre las diferentes causas |
| I.2. Diferenciación entre disnea de origen cardíaco y pulmonar |
| I.3. Evaluación de la disnea no explicable por el grado de alteración de las pruebas funcionales respiratorias |
| II. Evaluación de las enfermedades pulmonares obstructivas |
| II.1. Enfermedades pulmonares intersticiales |
| II.2. Enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) |
| II.2.1. Hipoxemia notable durante el ejercicio |
| II.2.2. Enfermedad cardíaca oculta |
| II.2.3. Patrón respiratorio ineficaz durante el ejercicio |
| II.3. Oclusión vascular pulmonar crónica |
| II.4. Fibrosis quística |
| III. Evaluación preoperatoria |
| III.1. Cirugía abdominal mayor, especialmente en pacientes de avanzada edad |
| III.2. Cirugía del cáncer del pulmón |
| III.3. Cirugía con reducción de volumen en el enfisema pulmonar |
| IV. Diagnóstico de asma inducida por el ejercicio |
| V. Programas de rehabilitación: evaluación del paciente y prescripción de ejercicio |
| VI. Evaluación de la disfunción-discapacidad |
| VII. Trasplante de pulmón, pulmón-corazón |

*Coordinador: J. Roca Torrent (Hospital Clínic i Provincial, Barcelona).

Participantes: F. Burgos Rincón (Hospital Clínic i Provincial, Barcelona), P. Casan Clará (Hospital de la Santa Creu i Sant Pau, Barcelona), F. Ortega Ruiz (Hospital Virgen del Rocío, Sevilla), L. Puente-Maestu (Hospital Primero de Octubre, Madrid) y B. Toghres Solivellas (Hospital de Son Dureta, Palma de Mallorca).

Correspondencia: Dr. J. Roca Torrent.
Servei de Pneumologia, Hospital Clínic.
Villarroel, 170. 08036 Barcelona.
Correo electrónico: jroca@clinic.ub.es

Recibido: 15-1-01; aceptado para su publicación: 11-5-01.

(Arch Bronconeumol 2001; 37: 247-268)

lance entre los acuerdos de carácter práctico para el desarrollo de las PECP y una explicación de las bases en que se sostienen tales acuerdos. Cuando se ha considerado que un análisis más exhaustivo de un determinado tema podría dificultar la lectura del documento, se decidió proporcionar las referencias bibliográficas necesarias para que el lector pudiera formarse su propia opinión al respecto. A pesar de que el grupo considera que el sistema de unidades internacionales (SI) tiene una mayor coherencia, hemos decidido utilizar las unidades tradicionales, mucho más familiares para los lectores, por criterios esencialmente prácticos. En el apéndice, junto a la descripción de las variables de interés, se proporcionan las equivalencias entre unidades tradicionales y sistema SI.

Sección 1

Respuesta al ejercicio y factores limitantes del consumo de O₂

El ser humano tiene un metabolismo esencialmente aeróbico. Ello implica que la energía necesaria para el desarrollo de la actividad física sostenible durante un cierto período de tiempo se obtiene a través de la respiración mitocondrial. Durante la misma, el consumo de O₂ ($\dot{V}O_2$) necesario para la oxidación de diferentes sustratos metabólicos (ciclo de Krebs) da lugar a la síntesis de moléculas con alto contenido energético (adenosíntrifosfato [ATP] y fosfocreatina [PCr]) que se utilizan para el desarrollo de la fuerza mecánica (contracción muscular) y el mantenimiento de la actividad metabólica celular durante el ejercicio. Los productos catabólicos resultantes de la respiración mitocondrial son esencialmente: CO₂ y agua. Durante el ejercicio intenso, y en situaciones vitales críticas, el organismo puede producir energía de forma transitoria y menos eficiente a través de la vía glicolítica, que constituye la fuente más notable de producción de ácido láctico.

TABLA II
Variables importantes y gráficos recomendados
(v. definiciones de las abreviaciones
y unidades en el apéndice I)

Variables	
Trabajo mecánico	Intensidad de trabajo (w)
Intercambio de gases	$\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$, RER, LT
Ventilación	\dot{V}_E , \dot{V}_T , f, \dot{V}_E reserva
Gases arteriales	PaO ₂ , PaCO ₂ , AaPO ₂ , V_D/V_T , SaO ₂
Cardiovascular	Frecuencia cardíaca (FC) reserva de frecuencia cardíaca, presión arterial sistémica, ECG, pulso de O ₂
Equilibrio ácido-base	pHa, PaCO ₂ , exceso de base o CO ₃ H ⁻ estándar
Síntomas	Disnea, dolor de piernas, dolor de pecho
Gráficos básicos (fig. 1)	
	1. $\dot{V}CO_2$ (eje-y) frente a $\dot{V}O_2$ (eje-x)
	2. $\dot{V}_E/\dot{V}O_2$ (eje-y) y $\dot{V}_E/\dot{V}CO_2$ (eje-y) frente a $\dot{V}O_2$ (eje-x)
	3. P _{ET} O ₂ (eje-y) y P _{ET} CO ₂ (eje-y) frente a $\dot{V}O_2$ (eje-x)
	4. RER (eje-y) frente a $\dot{V}O_2$ (eje-x)
	5. $\dot{V}O_2$ (eje-y) frente a carga (eje-x)
	6. \dot{V}_E (eje-x) frente a $\dot{V}CO_2$ (eje-x)
	7. Frecuencia cardíaca (eje-y) y $\dot{V}O_2$ /FC frente a $\dot{V}O_2$ (eje-x)
	8. V_T (eje-y) frente a \dot{V}_E (eje-x)

El desarrollo de ejercicio físico implica un aumento de la demanda celular de O₂, que determina una rápida respuesta fisiológica de todas las funciones implicadas en el transporte de O₂ desde la atmósfera a la mitocondria con el objetivo de aumentar el aporte de O₂: a) en los pulmones (ventilación e intercambio de gases); b) en el aparato cardiocirculatorio (aumento de débito cardíaco), y c) induciendo cambios en la microcirculación del músculo esquelético para aumentar la extracción de O₂ y homogeneizar las relaciones entre perfusión y $\dot{V}O_2$. En el sujeto sano, es bien conocido que la falta de actividad física (descondicionamiento físico) da lugar no sólo a una menor capacidad y rapidez de respuesta del sistema de transporte de O₂ ante el ejercicio físico, sino también a una disminución de la capacidad oxidativa mitocondrial. Por el contrario, el entrenamiento físico controlado mejora tanto el transporte de O₂ como el potencial oxidativo celular y, por tanto, la tolerancia al ejercicio físico.

La limitación de la tolerancia del ejercicio se produce cuando el sujeto es incapaz de sostener durante el tiempo necesario la carga de trabajo mecánico requerida para desarrollar una determinada tarea. La causa más común es que la capacidad de transporte y utilización de O₂ no cubre el incremento de demanda energética impuesta por el ejercicio físico. Las consecuencias inmediatas son la percepción de sensación de fatiga muscular e incluso dolor muscular y/o disnea. Los pacientes con enfermedad pulmonar presentan a menudo limitación de la tolerancia del ejercicio a valores bajos de carga de trabajo. Sin embargo, las características del perfil de la respuesta al ejercicio y el grado de limitación de la tolerancia al mismo dependen tanto del tipo de enfermedad pulmonar, la gravedad de la misma y sus consecuencias sistémicas. Esta sección analiza únicamente aspectos generales de la respuesta al ejercicio y de las estrategias de análisis que se aconsejan en el empleo de las pruebas de esfuerzo en la clínica. Para el estudio del perfil de respuesta característico de los diferentes tipos de enfermedad pulmonar (enfermedad pulmonar obstructiva crónica [EPOC]; neumopatía intersticial; enfermedad vascular oclusiva) remitimos al lector a la sección de estrategias de interpretación de las pruebas de esfuerzo o bien a textos especializados¹.

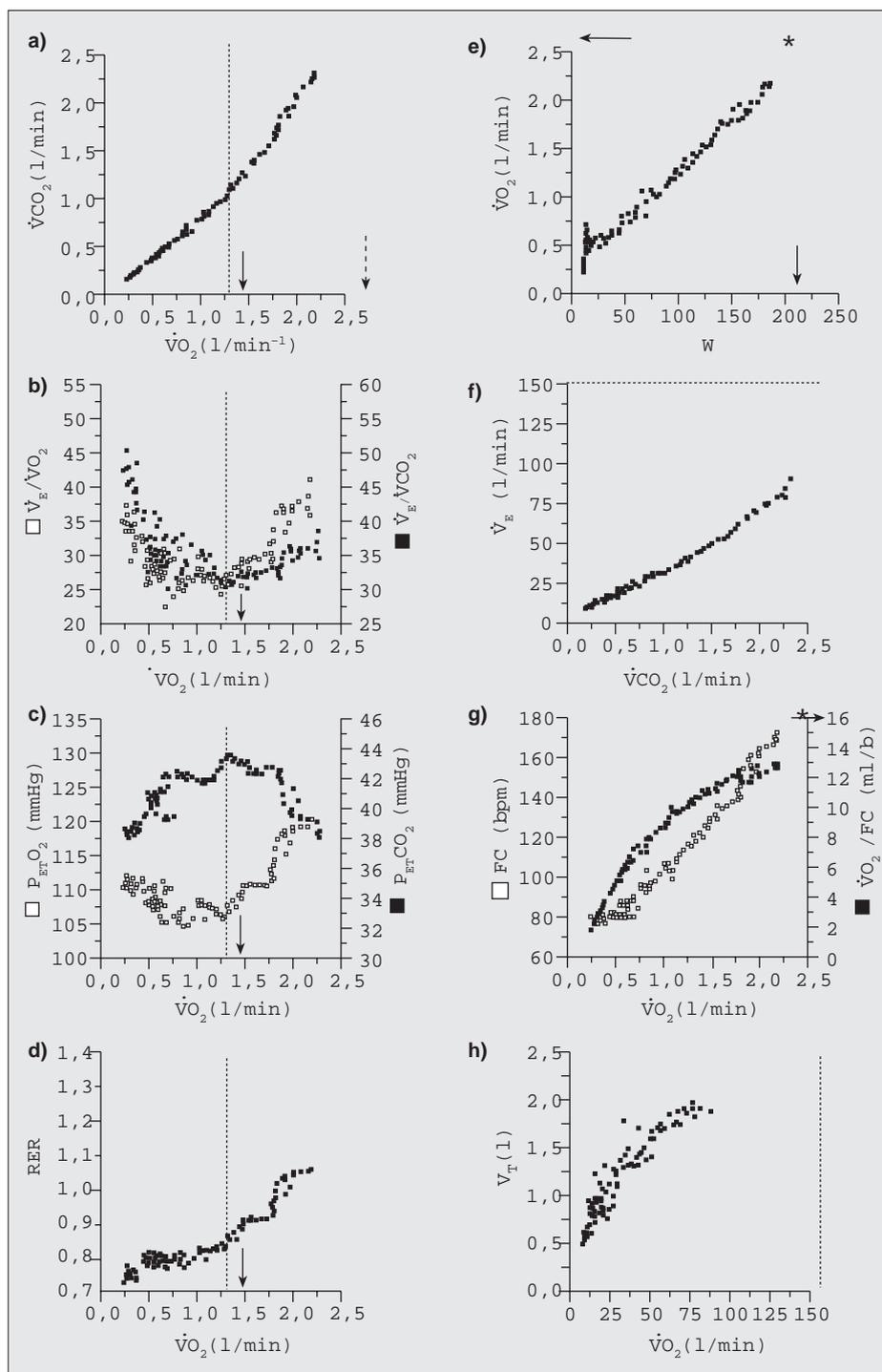
Las pruebas de ejercicio de tipo incremental (v. en Protocolos las modalidades y estrategias aconsejadas de incremento progresivo de cargas) constituyen las más adecuadas para evaluar tres aspectos que consideramos esenciales:

1. Determinar la magnitud y características de la respuesta de determinadas variables (tabla II y fig. 1) durante el ejercicio esperado en un sujeto sano.

2. Analizar los valores máximos alcanzados durante el ejercicio por las variables de interés en el sujeto estudiado.

3. Delimitar las fases relevantes de la respuesta al ejercicio, especialmente la transición entre ejercicio moderado y ejercicio intenso. En este último aspecto es importante analizar los conceptos de ejercicio submáximo y máximo.

Fig. 1. Resultado del ejercicio en un sujeto sano sedentario de 42 años. Presentación de los gráficos básicos recomendados para la interpretación de las pruebas de ejercicio cardiopulmonar (PECP). En las gráficas (a-d) de la columna izquierda se indica el $\dot{V}O_2$ (abscisas) en relación a las variables comúnmente usadas para estimar de manera indirecta el umbral láctico (LT, ver Apéndice). La línea vertical discontinua representa el $\dot{V}O_2$ en la zona de transición desde ejercicio de moderada a severa intensidad. El LT esperado para un sujeto sano (55% del valor de referencia del $\dot{V}O_2$ pico) se representa con una pequeña flecha de trazo discontinuo. El valor de referencia del $\dot{V}O_2$ pico se indica en el gráfico (a) con una flecha de trazo discontinuo. En la columna de la derecha, el gráfico (e) indica el $\dot{V}O_2$ frente a trabajo (vatios). Los valores máximos alcanzados en $\dot{V}O_2$ y vatios indican la tolerancia al ejercicio del sujeto. Los valores de referencia correspondientes se indican con un asterisco. Los gráficos (f) y (h) indican la respuesta de la ventilación frente a $\dot{V}CO_2$ y volumen corriente frente a ventilación. La línea de trazo discontinuo representa la ventilación máxima esperada. La diferencia entre ésta y la ventilación máxima alcanzada por el sujeto es la reserva ventilatoria. Finalmente, el gráfico (g) presenta las características de la respuesta hemodinámica (frecuencia cardíaca y pulso de oxígeno) al ejercicio. El valor de referencia de la frecuencia cardíaca máxima se representa por un asterisco y por una flecha el pulso de oxígeno.



Durante el ejercicio submáximo, los componentes del transporte de O_2 cubren de forma perfectamente adecuada los requerimientos impuestos por la intensidad del metabolismo celular y, por tanto, las necesidades de intercambio de O_2 y CO_2 entre la mitocondria y la atmósfera. Por otra parte, la capacidad oxidativa mitocondrial no ha sido alcanzada. En estas condiciones, los síntomas de disnea y fatiga muscular son tolerables y el

ejercicio, por debajo del umbral láctico, puede sostenerse de forma adecuada durante un período relativamente prolongado. Por el contrario, durante el ejercicio máximo el paciente finaliza la prueba por presentar síntomas que ya no son tolerables. Sin embargo, a este respecto existen tres posibilidades que deben ser cuidadosamente diferenciadas para una adecuada comprensión de la prueba de ejercicio:

1. La capacidad de incremento del transporte de O_2 ha sido alcanzada y, por tanto, el consumo máximo de O_2 ($\dot{V}O_{2\text{máx}}$). En estas condiciones, un aumento adicional del transporte de O_2 (respirando 100% O_2 o mediante el incremento de la concentración de hemoglobina) podría incrementar el $\dot{V}O_{2\text{máx}}$.

2. La capacidad oxidativa mitocondrial ha sido alcanzada y, por tanto, el $\dot{V}O_{2\text{máx}}$. En estas condiciones, un aumento adicional del transporte de O_2 no incrementará el $\dot{V}O_{2\text{máx}}$.

En ambas situaciones, al efectuar incrementos adicionales de carga (vatios, W) a ejercicio máximo, el $\dot{V}O_{2\text{máx}}$ no aumentará. Por tanto, en el $\dot{V}O_{2\text{máx}}$, la relación $\dot{V}O_2$ -W delimitará una meseta.

3. El nivel máximo de ejercicio alcanzado no requiere un agotamiento de la capacidad de transporte de O_2 , ni del potencial oxidativo mitocondrial. El ejercicio ha finalizado por la aparición de síntomas cuya intensidad no era tolerable por el paciente. En estas condiciones no podremos delimitar la forma de meseta en la relación $\dot{V}O_2$ -W y, por tanto, hablaremos de $\dot{V}O_2$ pico en lugar de $\dot{V}O_{2\text{máx}}$.

La valoración de una prueba de ejercicio no debe ceñirse a la identificación de la intensidad de ejercicio pico (W o $\dot{V}O_2$ pico) tolerada. Un aspecto capital es la valoración de la prueba como expresión de la respuesta integrada del organismo a la sobrecarga metabólica (aumento de demanda energética) que impone el ejercicio físico. En definitiva, deberán considerarse como aspectos básicos los siguientes: *a)* el perfil de la respuesta de las variables de interés durante el ejercicio submáximo, y *b)* la reserva funcional de los componentes del transporte de O_2 (ventilación, intercambio de gases, función cardiocirculatoria, etc.) en el ejercicio pico.

Los pacientes con una enfermedad pulmonar pueden presentar incrementos de ventilación por minuto (\dot{V}_E) o de débito cardíaco (\dot{Q}_T), para un determinado valor de $\dot{V}O_2$ submáximo o pico, semejantes a los observados en un sujeto sano, pero la sobrecarga del organismo (reflejado en la intensidad del trabajo respiratorio, la respuesta del intercambio pulmonar de gases, la función cardiovascular o el nivel de fatiga muscular) probablemente será mayor. En este sentido, la limitación de la tolerancia del ejercicio en los pacientes con EPOC no debe ser interpretada de forma excesivamente simple como una limitación de tipo ventilatorio, sino como una limitación de todo el sistema en la que los costes ventilatorios del ejercicio tienen seguramente un papel destacado. Las interacciones con otros componentes determinantes de la respuesta al ejercicio (\dot{Q}_T , transporte de O_2 en la microcirculación y los requerimientos metabólicos del músculo esquelético) son aún poco conocidas en estos pacientes. En estos momentos, resulta difícil establecer si simplemente el descondicionamiento físico propio de las enfermedades crónicas u otros factores miopáticos acompañantes pueden explicar la falta de incremento de $\dot{V}O_2$ pico después del trasplante bipulmonar, una vez la limitación de tipo ventilatorio y de intercambio pulmonar de gases ha sido resuelta de forma satisfactoria.

Sección 2 Indicaciones

La identificación adecuada del problema clínico que motiva la realización de una prueba de ejercicio cardiopulmonar y los objetivos específicos de la misma constituyen prerrequisitos indispensables para su indicación (tabla I). Para la realización de la PECP debe disponerse, como mínimo, de los siguientes datos del paciente: *a)* historia clínica; *b)* exploración física; *c)* radiografía de tórax; *d)* pruebas de función pulmonar (mínimo espirometría forzada), y *e)* electrocardiograma (ECG). Dicha información nos permitirá decidir el tipo de protocolo de ejercicio y las variables necesarias para la interpretación de la prueba, tal como se describe con detalle más adelante.

Las PECP ofrecen información para la evaluación del grado de disfunción en el momento del diagnóstico, la monitorización de la presencia de enfermedad y la determinación del pronóstico en un amplio abanico de condiciones patológicas, descritas en la tabla I. Asimismo, las PECP son útiles como prueba diagnóstica de: *a)* el asma inducido por el ejercicio; *b)* la isquemia miocárdica; *c)* la apertura del foramen oval con desarrollo de *shunt* derecha-izquierda durante el ejercicio, y *d)* el síndrome de McArdle.

2.1. Evaluación de factores limitantes de la tolerancia del ejercicio

La percepción de malestar que aparece con la respiración constituye un factor limitante de la actividad física en una mayoría de los pacientes con enfermedades respiratorias. En otros casos, la limitación de la tolerancia del ejercicio no puede adscribirse a disnea y resulta necesario su objetivación así como el análisis de los factores causales. El síntoma de disnea constituye la expresión por la cual se manifiestan los diferentes factores que contribuyen a la limitación del ejercicio de estos enfermos. En ocasiones, la disnea queda justificada por el grado de alteración de las pruebas de función pulmonar convencionales. Sin embargo, las pruebas de ejercicio cardiopulmonar tienen un especial interés en aquellos casos en los que existe una disociación de las manifestaciones clínicas (síntomas moderados o graves) y las pruebas de función pulmonar en reposo (normal o ligera afección). Las PECP permiten identificar la existencia de comorbilidad cardiovascular y evaluar la contribución de las diferentes enfermedades en la incapacidad del paciente². La realización de una PECP permite una valoración más objetiva y una mejor correlación con el estado sintomático y funcional del paciente³. Por tanto, la PECP estará indicada cuando: *a)* la causa de la disnea permanece sin aclarar tras la realización de las pruebas funcionales en reposo; *b)* la gravedad de la disnea es desproporcionada con los resultados de las otras pruebas de función pulmonar realizadas; *c)* coexistan varios procesos, en particular enfermedad cardíaca y respiratoria, y sea conveniente aclarar la contribución de cada uno de ellos a la sintomatología del paciente; *d)* se

sospeche que el descondicionamiento físico (sedentarismo), la falta de motivación (factores psicológicos) o la obesidad puedan ser la causa de la limitación de la tolerancia del ejercicio, y e) cuando sea importante examinar los posibles mecanismos que contribuyen a la limitación de la tolerancia del ejercicio o son responsables de la disnea⁴.

2.2. Evaluación de la disfunción en enfermedades pulmonares crónicas

Fibrosis intersticial idiopática. Estos pacientes desarrollan de forma característica un aumento del gradiente alveoloarterial de oxígeno con hipoxemia arterial durante el ejercicio. Las PECP han sido valoradas como pruebas sensibles para detectar la enfermedad en fases iniciales⁴. Asimismo, parecen ser útiles en la valoración del grado de disfunción en el momento del diagnóstico. Pueden ser también de utilidad en el seguimiento evolutivo y en la monitorización de la respuesta al tratamiento. Se ha descrito en un pequeño grupo de sujetos que las PECP pueden tener también un valor pronóstico⁵. No obstante, debe definirse el papel de las PECP en relación a la medición del factor de transferencia de CO (DL_{CO}sb) en la clínica diaria^{6,7}. Por otra parte, la utilidad de la PECP en los diferentes tipos de enfermedades intersticiales está aún por definir.

Enfermedad pulmonar obstructiva crónica. En estos pacientes, la PaO₂ puede cambiar de forma poco previsible durante la realización de un ejercicio. Determinados pacientes desarrollan una hipoxemia importante, algunos no presentan cambios en la PaO₂ mientras que otros incluso la incrementan. El estudio de la función pulmonar en reposo no permite predecir de forma adecuada la respuesta al ejercicio de estos pacientes. Por ello, es necesario la medida de los gases en sangre arterial durante el ejercicio para poder detectar la hipoxemia y valorar su contribución a la incapacidad del paciente. Por otro lado, la oxigenoterapia produce un aumento de la duración y tolerancia del ejercicio en la EPOC. Las PECP pueden ser útiles para la valoración de la respuesta de los pacientes a la administración de oxígeno y, por ello, necesarias en la determinación de una adecuada indicación de esta terapéutica⁸.

Enfermedad pulmonar vascular obstructiva crónica. Las PECP pueden ser útiles en la evaluación de pacientes con hipertensión pulmonar secundaria a enfermedad vascular pulmonar. Sin embargo, la realización de las PECP en estos pacientes tienen un riesgo significativo de mortalidad y no deberían indicarse cuando exista historia de arritmias, síncope o evidencia clínica de fallo cardíaco derecho. La valoración de la capacidad aeróbica y las desaturaciones durante el ejercicio son de ayuda en la determinación de la gravedad y respuesta al tratamiento⁹. Las indicaciones de las PECP en estos pacientes debe ser cuidadosamente establecida de manera individualizada.

Fibrosis quística. Las PECP son útiles en el manejo y valoración del pronóstico de los pacientes con fibrosis quística¹⁰.

2.3. Evaluación preoperatoria del riesgo quirúrgico

Las PECP pueden aportar una información muy útil en pacientes con riesgo moderado o grave para la resección pulmonar. Una predicción del FEV₁ o el DL_{CO}sb postoperatorio, tras una gammagrafía cuantitativa, inferior al 40% obligaría a la realización de una PECP. A los pacientes con una importante afección funcional pero que conserven un consumo máximo de oxígeno superior a 15 ml/kg/min, probablemente se les podría ofrecer la posibilidad de la cirugía¹¹. El uso de la PECP en estudios prospectivos pueden proporcionar información sobre la valoración pre y posquirúrgica de los pacientes candidatos a cirugía de reducción de volumen en el enfisema pulmonar^{12,13}.

En la evaluación preoperatoria en la cirugía de resección en el cáncer de pulmón, las PECP proporcionan información predictiva de la función pulmonar, ayudando a modular la cantidad de parénquima a resecionar y a determinar la estrategia necesaria para prevenir complicaciones posquirúrgicas.

2.4. Diagnóstico del broncoespasmo inducido por el ejercicio

El broncoespasmo inducido por ejercicio es un problema clínico frecuente que supone un importante aspecto en la calidad de vida de los pacientes y que puede pasar desapercibido o quedar enmascarado por la magnitud de otras manifestaciones. La broncoprovocación con ejercicio es positiva en el 70-80% de los pacientes con clínica de asma. Estaría indicada como:

1. Método diagnóstico. En pacientes con historia y examen físico sugerente de asma pero con una espirometría basal normal. Sin embargo, la estimulación por métodos farmacológicos (metacolina o histamina) tienen un mayor porcentaje de positividad. No obstante, al ser un desencadenante natural, simple y reproducible, es un método seguro en niños y adultos jóvenes.

2. Método diagnóstico de elección. En los casos infrecuentes de limitación de la tolerancia del ejercicio como única manifestación de la enfermedad.

3. Control de la respuesta a fármacos. Puede ser útil para predecir el grado de protección obtenido con un fármaco y se ha usado para el estudio de la eficacia de nuevos fármacos en el asma.

2.5. Programas de rehabilitación física

Las PECP son fundamentales en la valoración inicial del paciente, en la planificación del programa de entrenamiento más adecuado para el paciente y en la evaluación de los resultados. El ejercicio como terapia debe ser parte de los programas de rehabilitación con el objetivo de mejorar la calidad de vida en los pacientes con EPOC y otras formas de enfermedad pulmonar crónica. La efectividad del programa está relacionada con la frecuencia, la duración y la intensidad del entrenamiento. Sin embargo, existen controversias respecto a los tipos de programa de entrenamiento más apropiados^{14,15}.

2.6. Evaluación de disfunción-incapacidad

Las pruebas de función pulmonar en reposo son habitualmente usadas en la evaluación de una incapacidad laboral de origen respiratorio. En general, la grave incapacidad está presente cuando estas pruebas están notablemente alteradas. Por tanto, las PECP estarán indicadas en los casos de disociación entre la gravedad de la alteración y la poca magnitud de alteración de la función pulmonar en reposo.

El sujeto es considerado gravemente incapacitado si el $\dot{V}O_{2\text{máx}}$ es inferior a 15 ml/kg/min o si las demandas energéticas de su ocupación superan el 40% de su $\dot{V}O_{2\text{máx}}$. Otros autores prefieren considerar una invalidez grave si el $\dot{V}O_2$ no alcanza el 60% de sus valores teóricos¹⁶. En cualquier caso, la realización de PECP parece ofrecer una valoración más objetiva de la capacidad para desarrollar un trabajo que las pruebas de función pulmonar en reposo (espirometría forzada y DL_{COsb})¹⁷.

2.7. Trasplante pulmonar y cardiopulmonar

La PECP puede ser de utilidad en la valoración inicial de los candidatos a trasplante pulmonar o cardiopulmonar. Puede valorar la progresión de la enfermedad y estimar mejor el momento de la intervención. En el caso del trasplante cardíaco, los pacientes con $\dot{V}O_{2\text{máx}}$ superiores a 15 ml/kg/min son aceptados como candidatos en ausencia de contraindicación, mientras que en los pacientes con picos de $\dot{V}O_2$ inferiores a 10 ml/kg/min el trasplante debe diferirse¹⁸. Una correlación similar es improbable que exista en los candidatos al trasplante pulmonar debido a la diversidad de las enfermedades y diferentes pronósticos de las mismas. No obstante, en la fibrosis quística existen datos que correlacionan los resultados de la PECP con la supervivencia¹⁰. En los receptores del trasplante, pese a la mejoría en la capacidad de esfuerzo, durante el primer año del postoperatorio el $\dot{V}O_{2\text{máx}}$ permanece reducido entre el 40-60% de sus valores teóricos. Dicha alteración (descondicionamiento físico, citostáticos) es similar con los diferentes procedimientos quirúrgicos y, aunque puede ser debido a diferentes causas, los factores periféricos son probablemente los determinantes primarios de esta limitación al ejercicio¹⁹. La mayoría de los pacientes postrasplante reportan una considerable mejoría en su funcionalidad y con frecuencia con la reanudación de un estilo de vida normal. Los datos disponibles postrasplante demuestran que prácticamente todos los receptores presentan incapacidad al ejercicio, siendo atribuible a las disfunciones de los músculos esqueléticos. Por último, las PECP resultan fundamentales para el diseño de los programas de rehabilitación en los períodos pre y postoperatorio de estos pacientes.

Sección 3 Protocolos

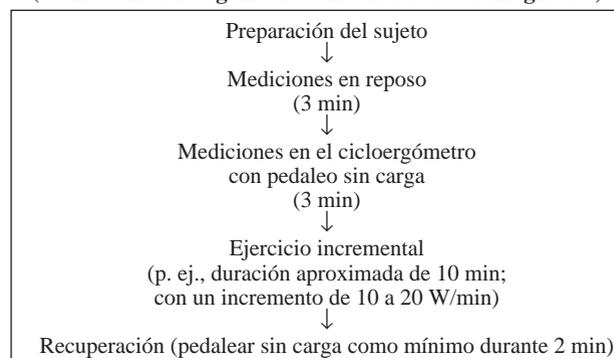
El objetivo de las PECP es provocar un incremento de los requerimientos energéticos mediante una carga de trabajo controlada para evaluar la reserva funcional

de los órganos y sistemas involucrados en la respuesta al ejercicio. Para ello, se aconseja ejercitar amplios grupos musculares, preferentemente de las extremidades inferiores. Un aspecto importante es que la intensidad del ejercicio debe ser cuantificable en términos de carga mecánica externa impuesta al organismo. Las pruebas de esfuerzo simples, tales como la distancia recorrida durante un período de tiempo determinado (prueba de marcha de 6 o 12 min)²⁰ pueden proporcionar una percepción de la tolerancia del ejercicio, pero no son tan útiles como las pruebas de ejercicio de tipo incremental por la imposibilidad de control de la carga externa y la implicación de factores como el aprendizaje y la motivación que incrementan la variabilidad de estas pruebas. En el presente documento, nos ceñiremos a la evaluación de protocolos de ejercicio recomendables para la clínica, de carácter no invasivo o mínimamente invasivo (obtención de muestra sanguínea arterial). Nos referiremos a dos tipos de protocolos de ejercicio: con incremento progresivo de carga y los que se efectúan a una carga constante.

3.1. Protocolos incrementales

La evaluación, de forma integrada, de la respuesta del organismo a un amplio espectro de intensidades de ejercicio durante un período relativamente corto de tiempo se efectúa de forma óptima mediante una prueba de ejercicio con incremento progresivo de carga hasta llegar al límite de la tolerancia determinado por los síntomas. Por tanto, la prueba de ejercicio de tipo incremental constituye la recomendada para evaluar tanto el perfil de la respuesta biológica durante el ejercicio submáximo como los valores de las variables de interés en el ejercicio pico (fig. 2). Una PECP de estas características comprende, tal como se describe en la tabla III, el análisis durante un período de aproximadamente 18-20 min desde el inicio al final de la prueba: *a*) una fase de reposo previo al ejercicio (aproximadamente 3 min); *b*) ejercicio sin carga (aproximadamente 3 min); *c*) incrementos progresivos de carga hasta el límite de tolerancia (aproximadamente 10 min), y *d*) durante la fase de recuperación (mínimo 2 min manteniendo el ejercicio sin carga). Se recomienda efectuar la prueba utilizando

TABLA III
Protocolos de ejercicio incremental
(usando un cicloergómetro con control electromagnético)



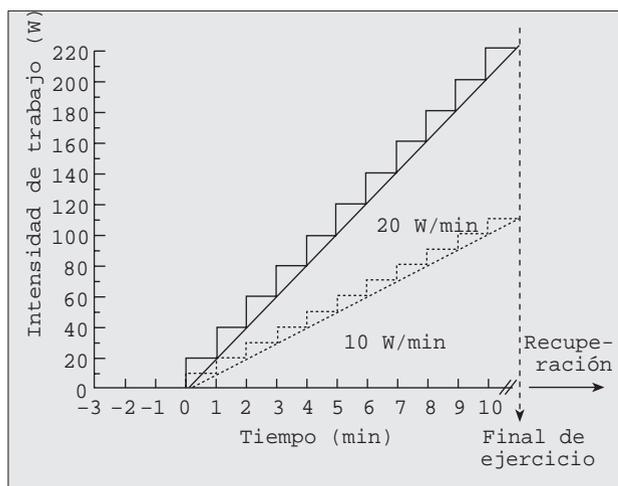


Fig. 2. Respuestas a rangos tolerables de intensidad de trabajo realizando una prueba de ejercicio incremental.

un cicloergómetro con control electromagnético empleando una frecuencia de pedaleo constante de aproximadamente 60 ciclos/min. Se obtienen resultados equivalentes tanto si la carga se incrementa de forma continua (prueba de rampa) o bien en forma de escalones fijos cada minuto (prueba escalonada) hasta que el paciente presenta limitación de la tolerancia por síntomas, de forma que no puede mantener la intensidad de trabajo a una frecuencia de pedaleo regular superior a 40 ciclos/min. La magnitud del incremento de la carga dependerá de las características del paciente, de forma que el período de incremento de cargas dure aproximadamente unos 10 min. Incrementos de 10 a 20 W/min suelen ser adecuados para sujetos sedentarios sanos, pero el estudio de pacientes puede requerir incrementos inferiores de carga²¹⁻²³. El diseño del protocolo y las mediciones a realizar dependerán básicamente de las características físicas del paciente y de los objetivos planteados al indicar la PECP. Asimismo, la duración del análisis durante el período de recuperación y el tipo de mediciones (con o sin boquilla) efectuadas dependerá de los objetivos de la PECP. En la sección 4 (equipamiento), se efectúa un análisis comparativo del cicloergómetro en relación al tapiz rodante. En caso de utilizar un tapiz rodante como ergómetro se aconseja, por su simplicidad, el protocolo de Balke²⁴, consistente en el mantenimiento de una velocidad constante del tapiz (entre 3 y 5,3 km/h) y la programación de incrementos de pendiente (entre el 1 y el 2%/min) hasta alcanzar la limitación por síntomas.

La PECP estándar deben contemplar mediciones no invasivas efectuadas durante la respiración de aire ambiente ($F_{I}O_2$ 0,21), que incluyen: a) medición de O_2 y CO_2 en aire espirado ($F_{E}O_2$ y $F_{E}CO_2$, respectivamente); b) carga de trabajo (W); c) ventilación por minuto (\dot{V}_E) y sus componentes (frecuencia respiratoria [FR] y volumen corriente [VT]); d) frecuencia cardíaca (FC), y e) presión sanguínea sistémica. El ECG y la pulsioximetría deben monitorizarse de forma continua durante el

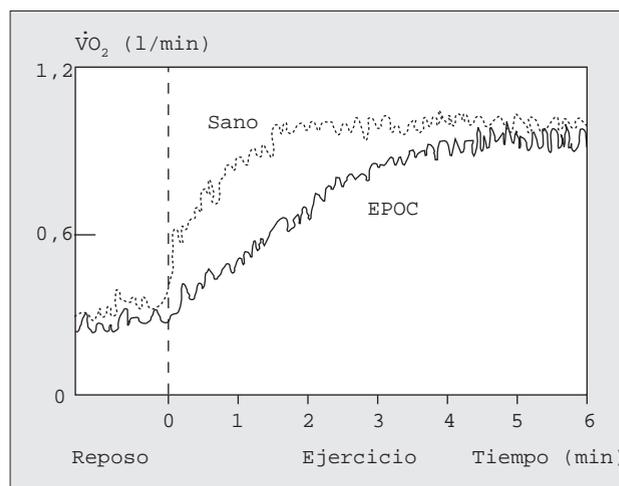


Fig. 3. Protocolo a carga constante. La línea vertical discontinua indica el inicio de la carga de trabajo. La respuesta del $\dot{V}O_2$ en pacientes con enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) está enlentecida con respecto a sujetos sanos.

desarrollo de la PECP. Asimismo, es útil determinar la percepción de síntomas durante y al finalizar la PECP. Ello incluye la intensidad del ejercicio, la disnea, el malestar torácico y la fatiga muscular. La cuantificación de estos síntomas debe efectuarse utilizando procedimientos estandarizados (escala de Borg, escala analógica visual)²⁵⁻²⁷. Sin embargo, la interpretación de las PECP en pacientes con enfermedad pulmonar a menudo requiere la evaluación del intercambio pulmonar de gases. En estos casos, el muestreo de sangre mediante canulación arterial (preferentemente radial o humeral) es necesaria para efectuar mediciones de presiones parciales de gases respiratorios (PaO_2 , $PaCO_2$ y $AaPO_2$)²⁸. Ello permite también obtener información sobre el equilibrio ácido-base (pH, $PaCO_2$ y exceso de base), así como la monitorización continua de la presión arterial durante la prueba. Debe señalarse que la punción arterial postejercicio, la utilización de muestras de sangre "arterializada", la estimación de la PaO_2 y la $PaCO_2$ a partir de los perfiles de O_2 y CO_2 de gases espirados y el empleo de pulsioximetría no son adecuados para evaluar el intercambio pulmonar de gases²⁹.

Protocolos a carga constante

Cuando un sujeto efectúa ejercicio a una carga constante de intensidad moderada, inferior al umbral láctico, suele alcanzar un $\dot{V}O_2$ estable (estado estacionario) (fig. 3) y puede prolongar la duración del ejercicio. Por el contrario, cuando la carga de trabajo tiene una intensidad elevada, superior al umbral láctico, la respuesta temporal de la mayoría de variables de interés suele presentar una pendiente positiva y el estado estacionario no se alcanza. Una primera utilidad de este tipo de protocolos con carga constante es la de evaluar si el sujeto es capaz de sostener un determinado nivel de ejercicio submáximo durante un período relativamente prolongado de tiempo. Asimismo, pueden ser útiles para la evaluación de las necesidades de oxigenoterapia durante el

TABLA IV
Condiciones para evaluar la presencia y gravedad de la broncoconstricción inducida por ejercicio

Seguridad	Deben evaluarse los factores o las contraindicaciones en los pacientes con broncoconstricción inducida por ejercicio. La saturación de oxígeno (SaO ₂) en reposo debe ser superior al 94% y debe monitorizarse de forma continua con pulsioximetría
Mediciones	La medición del FEV ₁ es obligatoria, preejercicio y a los 1, 3, 5, 7, 10, 15, 20 y 30 min postejercicio. En atletas el FEF ₂₅₋₇₅ debe incluirse en la evaluación de la broncoconstricción inducida por ejercicio
FEV ₁ en reposo	> 75% del valor de referencia o el 80% del valor habitual (si es conocido) y reproducible (p. ej., < 10% de variación)
Retirada de la medicación	A las 6 h los broncodilatadores de corta duración, cromoglicato sódico y nedocromil sódico; a las 24 h para los broncodilatadores de larga duración, teofilinas y antihistamínicos, y sin esteroides o cafeína el día del estudio
Factores que deben ser controlados	Broncoconstricción inducida por ejercicio superior a 3 h. Infección inferior a 6 semanas. La exposición al polen (la prueba debe ser efectuada fuera de la época de polinización, en los pacientes sensibles al polen)
Tipo de ejercicio	Carrera o pedaleo. La bicicleta es recomendable por ser más segura y fácil
Intensidad de ejercicio	VO ₂ suficiente para alcanzar un V _E (l/min) en ejercicio de 18,5 ± 3,5 veces el FEV ₁ predicho durante al menos 4 min; V _E (l/min) = 28 × VO ₂ (l/min) + 0,27; VO ₂ (ml/min) = 10 × W + 500. Para el tapiz rodante el VO ₂ > 35 ml/kg/min para alcanzar el V _E requerido
Duración del ejercicio	Entre 6 y 8 min para alcanzar V _E necesaria y sostenida durante al menos 4 min
Aire inspiratorio	Se recomienda aire comprimido de botella. El aire ambiente debe contener menos de 10 mgH ₂ O/l, una temperatura inferior a 25 °C y una humedad relativa inferior al 50%. El aire frío se usará sólo en caso de reproducir las condiciones ambientales.
Índice de gravedad	Si los pacientes no toman corticoides orales o inhalados, se considerará ligero un descenso del FEV ₁ de 10-25%, moderado del 25-50% y grave superior al 50%.
Recuperación	Espontánea o con administración de un β ₂ -agonista. Debería preverse la administración de O ₂ suplementario en caso de ser necesario durante la realización de la prueba

ejercicio simulando los valores de $\dot{V}O_2$ que puedan requerirse durante determinadas actividades diarias.

Los protocolos con carga constante son también útiles para valorar la cinética del intercambio de gases respiratorios, O₂ y CO₂, mediante el ajuste de una función monoexponencial (fig. 3). Determinadas situaciones (hipertensión pulmonar, EPOC, desentrenamiento, etc.) cursan con un entencimiento de la cinética del O₂ durante el ejercicio a una carga submáxima fija, que se corrige con el tratamiento de la problemática de base (entrenamiento físico, tratamiento médico de la enfermedad de base). Sin embargo, la estandarización y la validación de estas aplicaciones requieren futuros estudios antes de su aplicación generalizada en la clínica.

En la detección del asma inducido por el ejercicio es importante alcanzar unos niveles de ventilación y pérdida de humedad del gas de las vías aéreas susceptibles de desencadenar una respuesta broncoconstrictora (tabla IV). El protocolo recomendado consistiría en un rápido incremento de la carga de trabajo hasta conseguir un alto grado de ventilación durante al menos 4 min (\dot{V}_E 15-20 veces el valor de referencia del FEV₁) mientras el paciente respira aire que contenga menos de 10 mg/l de agua a 20-25 °C y la humedad relativa sea inferior al 50%. El aire comprimido proporciona unas condiciones adecuadas. En pacientes que presentan broncoprovocación por ejercicio, los valores de FEV₁ generalmente disminuyen dentro de los primeros 10 min después de cesar el ejercicio, con una sustancial recuperación a los 30 min postejercicio. Un protocolo útil para evaluar la respuesta al ejercicio es la monitorización con espirometría forzada efectuada antes y a los 1, 3, 5, 7, 10, 15, 20 y 30 min después del ejercicio. La respuesta es evaluada como el porcentaje de caída que se produce en el

FEV₁ postejercicio. Valores de un descenso del 10% en el FEV₁ después del ejercicio se consideran anormales y superior al 15% como diagnóstico de broncospasmo inducido por ejercicio³⁰.

3.3. Pruebas de marcha

Las pruebas de marcha durante un tiempo determinado son usadas para evaluar la tolerancia al ejercicio en pacientes con enfermedades respiratorias crónicas graves. La distancia recorrida en un período de tiempo fijado (6 o 12 min) es dependiente de la motivación del paciente y no hay acuerdo en la estandarización de este tipo de pruebas con respecto a aspectos como: a) grado de estimulación que debe efectuar el técnico o fisioterapeuta; b) si la botella de oxígeno debe ser llevada por el paciente o por el fisioterapeuta, o c) si la prueba debe efectuarse en un espacio cerrado o abierto. Las pruebas de marcha durante un tiempo determinado no tienen una buena correlación con los índices de función pulmonar medidos en condiciones de reposo. Sin embargo, la prueba de marcha de 6 min tiene un uso generalizado en la clínica y presenta una cierta coincidencia con la calidad de vida relacionada con la salud. Además, diversos estudios han demostrado su valor predictivo en la evolución de: a) pacientes con hipertensión pulmonar primitiva³¹; b) trasplante pulmonar en fibrosis quística, y c) en pacientes con EPOC³². Por tanto, la adecuada estandarización de dicha prueba y un mayor conocimiento de su utilidad clínica deben ser objetivos prioritarios. La prueba tipo episodios *shuttle* podría tener algunas ventajas si se compara con las clásicas pruebas de marcha, dado que se incorpora el control de la velocidad a través de un ritmo fijado. El paciente camina du-

rante 10 m adecuadamente señalizados a una velocidad que es marcada por un sistema acústico, tipo metrónomo. La velocidad es incrementada en cada episodio, cada minuto con un pequeño aumento (p. ej., 0,1-0,2 m/s). El parámetro de medida es el número de episodios que realiza el paciente hasta que se ve forzado a finalizar por: a) disnea; b) no haber completado el recorrido entre episodios, o c) hasta que se alcanza el 85% de la frecuencia cardíaca máxima $200-(0,65 \times \text{edad})$.

3.4. Protocolos para la detección de la isquemia miocárdica

Durante años los cardiólogos han usado las pruebas de ejercicio con tapiz rodante utilizando protocolos incrementales para detectar la isquemia miocárdica. En uno de los protocolos más usados, el de Bruce³³, se inicia el ejercicio caminando en el tapiz rodante durante 3 min a 2,7 km/h al 0,5 o el 10% en el grado de inclinación, dependiendo del estado físico y el entrenamiento previo del paciente. El grado de inclinación del tapiz y la velocidad se incrementa un 2% cada 3 min y 1,8 km/h, respectivamente, hasta alcanzar un grado de inclinación del 18% y una velocidad de 8 km/h. Después se incrementa 0,8 km/h cada 3 min. Durante la realización de la prueba se monitoriza la presión arterial y el electrocardiograma, utilizando 12 derivaciones que son recogidas en cada escalón y durante el período de recuperación postejercicio. Se da por finalizada la prueba cuando se detecta una caída de la presión arterial y/o alteraciones del ECG significativas (p. ej., 2 mm en la depresión ST o arritmias ventriculares).

Sección 4

Equipamiento y mediciones

4.1. Ergómetros

Los tipos de ergómetro comúnmente empleados para la realización de PECP son el tapiz rodante y el cicloergómetro.

El tapiz rodante proporciona incrementos progresivos de carga mediante la combinación de aumentos de velocidad y del incremento del grado de inclinación del tapiz rodante. El consumo pico de oxígeno ($\dot{V}O_2$ pico) obtenido en el tapiz rodante es entre el 5 y el 10% más alto que el obtenido con el cicloergómetro^{34,37}. Este hecho puede ser importante para detectar alteraciones, como la isquemia miocárdica, sólo detectables ante un aumento notable de la demanda metabólica. La mayor desventaja del tapiz rodante es la dificultad de controlar la intensidad del trabajo realizado de una forma exacta. Resulta difícil de establecer la relación entre la velocidad y el grado de inclinación del ergómetro con el coste metabólico del ejercicio debido a la variabilidad que introducen diversos factores como: a) el peso corporal del sujeto; b) la destreza al "caminar" sobre el tapiz rodante y el ritmo del paso, y c) la impredecible disminución del nivel de ejercicio cuando el sujeto utiliza el pasamanos del tapiz rodante.

El cicloergómetro tiene diversas ventajas sobre el tapiz rodante, que motivan su recomendación como equipo para la realización de PECP en la clínica. En general, es más barato, requiere menos espacio y produce menos artefactos en el registro del ECG y en la auscultación de la presión arterial sistémica. Pero su mayor ventaja radica en la facilidad de cuantificar de forma adecuada la intensidad del ejercicio y, por tanto, analizar la relación entre el $\dot{V}O_2$ y la carga de trabajo. Sin embargo, un problema común a la mayoría de cicloergómetros es la imposibilidad real de desarrollar ejercicio a carga cero o muy baja, debido a la resistencia interna del aparato^{21,38-40}. Recientemente, en algunos cicloergómetros se han introducido un sistema de compensación de la resistencia que permite efectuar un verdadero pedaleo sin carga.

4.2. Medición del intercambio de gases

El análisis de la respuesta del O_2 y CO_2 espirados durante el ejercicio constituye un aspecto central para el cálculo del consumo de oxígeno ($\dot{V}O_2$) y de la producción de CO_2 ($\dot{V}CO_2$) y, por ende, de la interpretación de la PECP. Por tanto, la metodología utilizada para la medición del intercambio de gases respiratorios es de importancia capital.

La técnica más simple de medición de la $F_{E}O_2$ y $F_{E}CO_2$ es a través de la colección de muestras de gas espirado mezclado en una bolsa meteorológica. Conociendo la $F_{I}O_2$ (0,21), la medición de la $F_{E}O_2$ y $F_{E}CO_2$, así como del volumen ventilado en un determinado período de tiempo, permite el cálculo del $\dot{V}O_2$ y el $\dot{V}CO_2$ siguiendo las fórmulas estándares (apéndice). Este método de muestreo del gas espirado y de cálculo de la \dot{V}_E puede proporcionar una gran exactitud de cálculo de los valores del $\dot{V}O_2$ y el $\dot{V}CO_2$, pero resulta inadecuado para la realización de protocolos de ejercicio con incrementos rápidos de la carga debido a las rápidas variaciones temporales que experimentan las variables de interés. En la actualidad, la colección de muestras de gas espirado en bolsas meteorológicas se utiliza únicamente como técnica de validación.

La medición de la \dot{V}_E y el muestreo de gas espirado de una caja de mezclas de aproximadamente 6 l de volumen permite la monitorización continua del $\dot{V}O_2$ y el $\dot{V}CO_2$. Este método presenta ventajas sobre el descrito anteriormente y resulta adecuado para las mediciones efectuadas en estado estacionario e incluso en protocolos de tipo incremental en la clínica, si la caja de mezclas tiene un diseño correcto. Sin embargo, este método presenta claras limitaciones para el análisis detallado del perfil de la respuesta de los gases respiratorios durante protocolos incrementales y en la evaluación de la cinética del O_2 en protocolos efectuados a una carga submáxima constante.

La posibilidad del tratamiento de las señales biológicas con ordenador permitió el cálculo del volumen espirado y del $\dot{V}O_2$ y el $\dot{V}CO_2$ para cada respiración (técnica de respiración a respiración)⁴¹⁻⁴⁵. Los detalles de esta técnica de cálculo han sido ampliamente referidos en la

bibliografía⁴¹⁻⁴⁸ y, en la actualidad, este método puede considerarse como estándar para la utilización clínica.

4.3. El umbral láctico

Aunque persiste la controversia respecto a los mecanismos fisiológicos que determinan el fenómeno del umbral láctico, se acepta que el valor de $\dot{V}O_2$ en el que se produce un incremento de la concentración de ácido láctico [La] en sangre arterial determina los siguientes aspectos:

1. Delimita la transición entre ejercicio moderado y ejercicio intenso.
2. Indica el punto en que se desencadenan una serie de respuestas fisiológicas que implican un incremento sustancial de la \dot{V}_E , del intercambio pulmonar de gases y del equilibrio ácido-base.
3. Tiene importantes implicaciones en lo que respecta a la capacidad de sostener el nivel de ejercicio tanto en sujetos sanos como en enfermos. Las intensidades de ejercicio por debajo del umbral láctico son, en general, sostenibles durante un período relativamente prolongado de tiempo en condiciones de estado estacionario.

El umbral láctico es bastante específico del tipo de ejercicio realizado y está reflejando la magnitud de la masa muscular sobre la que el trabajo se efectúa. Para un mismo sujeto, es apreciablemente menor para el ejercicio de los brazos que el de las piernas y, generalmente, menor con cicloergometría que con el ejercicio efectuado con tapiz rodante.

4.3.1. Estimaciones directas del umbral láctico

El perfil de la respuesta del [La] (o del exceso de base) en relación al $\dot{V}O_2$ constituye la estimación directa más simple del umbral láctico, pero no la más sensible ya que la identificación de la zona de inflexión del incremento del [La] puede resultar difícil. Se utilizan como alternativas más sensibles el análisis de la rela-

ción entre el [La] y el ácido pirúvico en sangre arterial, así como la transformación logarítmica del [La] (también pueden emplearse la concentración de exceso de base o de bicarbonato estándar). Sin embargo, ninguno de estos métodos directos suele utilizarse clínicamente.

4.3.2. Estimaciones indirectas (no invasivas) del umbral láctico

En las PECP efectuadas en el ámbito clínico, la estimación del umbral láctico suele realizarse utilizando el perfil de respuesta al ejercicio submáximo de un conjunto de variables ventilatorias y de intercambio de gases (fig. 1).

En las PECP en que el incremento de carga se efectúa cada 1-2 min, la hiperventilación se produce de forma prácticamente coincidente con el incremento del [La] o la disminución del bicarbonato estándar y el exceso de base (método del equivalente ventilatorio) (v. apéndice I).

El método de *V-slope* se desarrolló como alternativa para evitar la problemática del método del equivalente ventilatorio. En este caso, el umbral láctico puede identificarse a través de la relación entre $\dot{V}CO_2$ (ordenada) y $\dot{V}O_2$ (abscisa) (fig. 4). El umbral láctico se sitúa en la intersección entre la recta que define los cambios de $\dot{V}CO_2$ en relación al $\dot{V}O_2$ en la fase inicial del ejercicio (S_1 en la figura 4) y la tangente a la curva entre estas dos variables en la fase de hiperventilación próxima a ejercicio máximo (S_2). La pendiente de la recta S_1 se aproxima a la unidad y no cambia con las rapidez de aumento de cargas en el incremental. En aquellos casos en que las zonas correspondientes a S_1 y S_2 no se perciben como suficientemente lineales para establecer un punto de intersección que tenga significación fisiológica, se propone que el umbral láctico se defina como la zona de intersección entre S_2 y una línea cuya pendiente sea igual a 1,0 (45°). En la práctica, se desaconseja el uso indiscriminado del método de *V-slope* o de cambios en la \dot{V}_E para establecer el umbral láctico, sin el adecuado soporte de que el punto identificado como umbral láctico corresponde a un incremento de acidosis metabólica. Ello es especialmente importante en pacientes con EPOC grave.

La validación de la estimación no invasiva del umbral láctico bajo condiciones "complejas", como la hiperventilación crónica, la hipoxemia progresiva inducida por el ejercicio y la disminución de la sensibilidad en los quimiorreceptores periféricos asociados a un apreciable incremento de la resistencia de las vías aéreas, todavía no se han establecido completamente.

4.4. Sistema de medición

En la figura 5 se describen las características esenciales de un equipo de medición de PECP. Básicamente, se trata de un ordenador que permite la captación (con una frecuencia de muestreo de 50 a 100 Hz) de diferentes señales biológicas, la realización de cálculos con las mismas para derivar las variables de interés y el almacenamiento tanto de las señales (para permitir su posterior verificación y realización de nuevos cálculos), como de las variables calculadas; asimismo, el ordenador debe

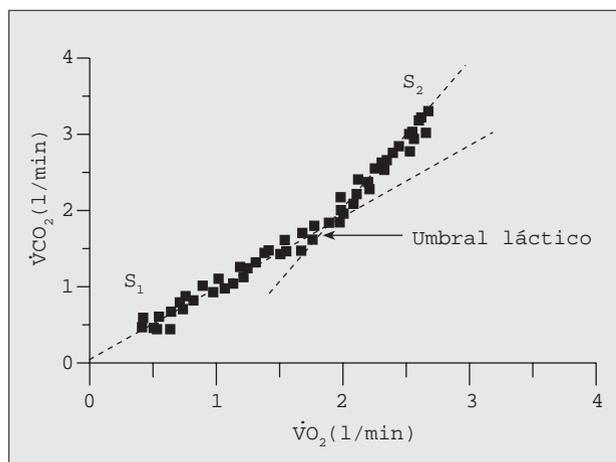


Fig. 4. Método de "V-slope" ($\dot{V}CO_2$ frente a $\dot{V}O_2$ durante un ejercicio incremental). Las líneas discontinuas reflejan las respuestas de la pendiente inferior (S_1) y superior (S_2) que se intersecan en el umbral láctico (LT).

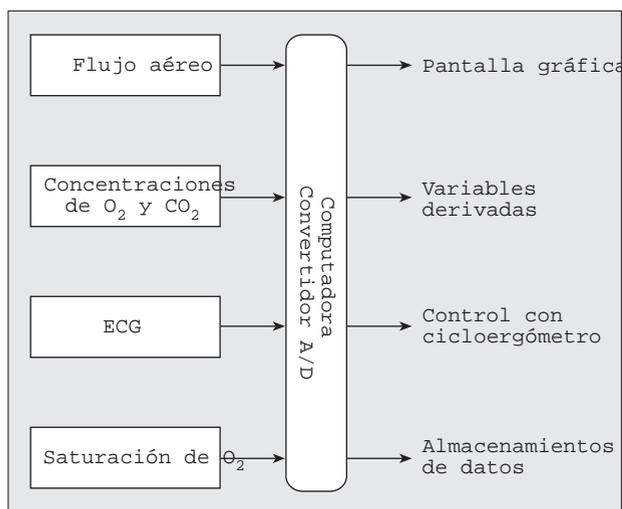


Fig. 5. Diagrama de un sistema computarizado de pruebas de ejercicio cardiopulmonar (PECP).

disponer del *software* adecuado para la elaboración del informe final, que debe combinar aspectos gráficos (fig. 1) y de texto. Las señales biológicas que se captan de forma analógica son: a) medidor de flujo o volumen; b) analizadores de gases; c) ECG; d) carga del ergómetro, y, e) pulsioximetría. Los resultados de las mediciones de presión arterial sanguínea y, eventualmente, del análisis de sangre arterial (PaO₂, PaCO₂ y pH) se incorporarán al informe final, después de introducirlos de forma manual en el ordenador. En el presente documento no se efectúa una descripción detallada de las diferentes modalidades de aparatos de medición. Nos limitaremos a citar aquellas modalidades que pueden proporcionar mediciones adecuadas y los estándares de calidad de medición exigibles, junto con referencias bibliográficas que describen de forma pormenorizada los aspectos relacionados con el control de calidad así como aquellos aspectos puntuales de los equipos de medición que son propios de las PECP (p.ej., ECG).

4.4.1. Medición de flujo o volumen del aire respirado

Existe una gran variedad de transductores potencialmente utilizables. Un aspecto esencial es que el tipo de transductor escogido debe cumplir de forma estricta los estándares de calidad de medición establecidos por la ERS⁴⁹ y la ATS⁵⁰. Son de utilización común los siguientes:

1. Neumotacógrafos. Miden la diferencia de presión a través de la resistencia al flujo que ofrece una malla. El flujo de características laminares es proporcional al descenso de presión a través de la malla.

2. Medidor de flujo Pitot. Mide la diferencia de presión entre orificios que reciben el flujo de forma frontal y otros situados perpendicularmente respecto a la dirección del flujo aéreo. En este caso la diferencia de presión es proporcional al cuadrado del flujo⁵¹.

3. Medidor de flujo de masa. El principio de medición consiste en el análisis de la diferencia de tempera-

tura entre dos filamentos metálicos colocados en la dirección del flujo. En realidad, la señal generada es proporcional al número de moléculas por unidad de tiempo que circulan a través del sensor.

4. Turbina. Un lector de impulsos luminosos está colocado en la corriente de flujo, contándose el número de interrupciones del destello de luz como impulsos que son calculados por un sistema computarizado. La señal generada requiere correcciones, que pueden efectuarse por medio del ordenador, para evitar la infravaloración o sobrevaloración del volumen respirado (debido a la inercia), al inicio y al final de cada respiración, respectivamente.

4.4.2. Analizadores de gases

Los mejores equipos de medición son los espectrómetros de masa por su linealidad, exactitud, precisión, alta estabilidad y rapidez de respuesta. Se suelen configurar para "ignorar" la presión de vapor de agua y, por tanto, proporcionar concentraciones de gas en condiciones de PH₂O igual a 0 mmHg. El principal problema de este tipo de equipos es su alto coste económico. Los requerimientos de los analizadores son la estabilidad y la rapidez en la respuesta. La respuesta dinámica de los analizadores tiene dos componentes: el retraso en el transporte (tiempo requerido para que el gas llegue desde el lugar de muestreo al analizador) y la respuesta del análisis (la cinética de la respuesta al cambio en la composición del gas introducido en el analizador). Ambos retrasos deben tenerse en cuenta para el cálculo del retraso de la señal. La mayoría de equipos de uso comercial utilizan medidores de O₂ y CO₂ que suelen cumplir de forma correcta los requisitos necesarios para la realización de PECP. Los más comunes son los analizadores de absorción de luz infrarroja para la medición del CO₂⁵² y los analizadores paramagnéticos y electroquímicos (con célula de óxido de zirconio) para la medición del O₂. Cuando se utiliza este tipo de analizadores, el tratamiento de la presión de vapor de agua se soluciona utilizando un tubo de muestreo fabricado con el polímero nafión. Dicho polímero contiene grupos sulfidrido que absorben el vapor de agua sin retrasar el análisis de las señales de O₂ y CO₂.

4.4.3. Registro del ECG

Se aconseja utilizar un ECG de 12 derivaciones para el estudio de sujetos en los que se procede a la indicación de PECP para la detección de la enfermedad. Es importante detectar depresiones del segmento ST y cambios en la onda T propios de la isquemia miocárdica, así como diagnosticar de forma adecuada las arritmias desencadenadas por el ejercicio^{53,54}. La utilización de ECG con 3 derivaciones es útil para el registro de la frecuencia cardíaca en sujetos jóvenes en los cuales la PECP se indica para establecer el nivel de tolerancia del ejercicio, pero no para explorar la existencia de enfermedad. Los electrodos deben ser colocados utilizando adhesivos resistentes al sudor y el diseño del circuito electrónico debe estar preparado para evitar los artefactos generados por los movimientos durante el ejercicio. El *software* del ordenador debe permitir un seguimiento

continuo de los complejos del ECG en pantalla por motivos de seguridad para el paciente durante la PECP. Asimismo, es conveniente que disponga de algoritmos que permitan el tratamiento de los complejos del ECG (promedio de la señal de diferentes complejos) para mejorar la detección de cambios isquémicos. El lector puede encontrar una descripción detallada de los métodos de colocación de los electrodos y de los requerimientos del registro del ECG en las recomendaciones de la AHA en 1995⁵⁵.

4.4.4. Pulsioxímetro

Los equipos de pulsioximetría detectan la variación en la transmisión de la luz de dos longitudes de onda que se presenta con la pulsación arterial (generalmente en el dedo o en el lóbulo de la oreja). Dado que las hemoglobinas oxigenada y reducida transmiten cierta luz con una diferenciada longitud de onda, esta información puede ser usada para estimar la saturación de oxihemoglobina (SaO₂). El pulsioxímetro es útil y conveniente para la monitorización continua, pero hay que tener en cuenta diversos aspectos en el contexto de las PECP. Los pulsioxímetros tienen una limitada precisión (\pm 4-5%) si se compara con la SaO₂ medida directamente⁵⁶. Algunos autores han descrito que los pulsioxímetros tienden a sobrestimar los valores de SaO₂^{57,59}. Por otro lado, una pobre perfusión en la extremidad (descenso de la pulsatilidad), que puede ocurrir en las enfermedades cardiovasculares, puede producir lecturas inferiores a la realidad⁶⁰. La pigmentación de la piel, los movimientos del sensor y la luz directa pueden artefactuar la señal e inducir a lecturas erróneas. La presencia de carboxihemoglobina o metahemoglobina no es detectada por estos equipos. El pulsioxímetro tiene un papel central en la monitorización durante el ejercicio pero no debe utilizarse de forma diagnóstica para estimar los valores de PO₂ arterial.

4.4.5. Medición de la presión arterial (no invasiva)

La presión arterial puede ser más difícil de auscultar en el transcurso de la prueba de ejercicio debido al incremento del ruido ambiental. Sin embargo, la detección de hipertensión inducida por el ejercicio y, en menor manera, la detección de la hipotensión es una meta importante en muchas circunstancias. Se han desarrollado sistemas automáticos específicos de medición de la presión arterial durante el ejercicio. A pesar de los algoritmos diseñados para reducir el impacto del ruido y los artefactos, la medición de la exactitud de la medición de la presión arterial puede no ser la óptima cuan-

do, por ejemplo, el brazo del paciente se flexiona durante la prueba de ejercicio. Deben efectuarse controles periódicos del manguito automático contra un sistema manual.

En los estudios en los que se coloca un catéter arterial para facilitar la extracción de muestras sanguíneas, es útil medir la presión arterial directamente. Se aprecian pequeñas diferencias entre la presión auscultada y la medida intraarterial. Se pueden colocar pequeños transductores de presión en el brazo del paciente mientras se efectúa la PECP. Se debe cumplir un riguroso control de la técnica (p. ej., expulsión de las burbujas) para asegurar una respuesta en frecuencia. Los equipos intraarteriales deben cumplir los criterios de esterilización en su colocación y manipulación.

4.5. Puntuación de la información subjetiva

La percepción que tiene el paciente durante y al finalizar la PECP debe ser registrada usando procedimientos cuantitativos estandarizados. Esta evaluación debe incluir la percepción de ahogo, disnea, dolor en el pecho y esfuerzo muscular. El grado de ahogo debe ser registrado usando una escala analógico visual. La escala debe ser capaz de poder usarse durante la realización del ejercicio⁶¹.

4.6. Programa de control de calidad

En los equipos de PECP adquiridos como unidades completas, el vendedor debe proporcionar los medios necesarios para demostrar la calidad de las mediciones y la información sobre los pormenores de los métodos de medición de las señales y algoritmos del cálculo de las variables. Por su parte, el usuario debe establecer dentro de la rutina de funcionamiento un programa de mantenimiento preventivo y una sistemática de control de calidad, que asegure que las mediciones obtenidas diariamente con el equipo son exactas y reproducibles dentro de los rangos establecidos. Un aspecto esencial del programa de control de calidad es disponer de un libro de registro de las calibraciones e incidencias del equipo de medición o cambios en los procedimientos de realización de las PECP. En la tabla 5 se describen las características de rango de medición, exactitud, reproducibilidad y rapidez de respuesta que deben cumplir los principales equipos de medición empleados. Asimismo, se indican las referencias bibliográficas que describen con detalle los procedimientos de calibración mencionados en el texto.

TABLA V
Mínimos requerimientos de los equipos

Equipamiento	Rango	Exactitud	Reproducibilidad*	Respuesta en frecuencia	Señal de prueba
Analizador de O ₂	0-100%	1%	1%	< 130 ms	Al menos, dos puntos de calibración
Analizador de CO ₂	0-10%	1%	1%	< 130 ms	Al menos, dos puntos de calibración
Medidor de flujo	0-14 l/min	3%	3%	< 40	Jeringa de 3 l
Cicloergómetro	0-600 W	2% o 3 W por encima de 25 W	-	-	Calibrador dinámico (Dynamic Torquemeter)

*Linealidad entre el porcentaje indicado del fondo de escala para cada uno de los aparatos.

4.6.1. Calibración diaria

Un aspecto básico es la determinación de las condiciones ambientales de presión barométrica, temperatura y humedad relativa. Las calibraciones descritas como básicas se efectuarán al menos con una periodicidad diaria, aunque es aconsejable realizarlas antes de cada prueba. Los equipos comerciales suelen facilitar enormemente las calibraciones consideradas básicas.

La calibración del medidor de flujo o volumen se efectuará con una jeringa de precisión de 3 l, simulando un amplio espectro de flujos que cubran el rango de la señal desde la condición de reposo a la de ejercicio máximo^{49,50}.

En lo que respecta a la calibración de los analizadores de O_2 y CO_2 , se requiere la calibración diaria con un mínimo de 2 puntos (0 y 8% para CO_2 ; 13 y 21% para O_2) para cada analizador, siendo altamente deseable realizar un control para asegurar la linealidad de la lectura de otras composiciones de gas como: 3% CO_2 y 13% O_2 , 6% CO_2 y 17% O_2 y 0% CO_2 y 21% O_2 . Aunque el analizador no sea lineal, la lectura obtenida a partir del ordenador que controla la prueba debe ser lineal. Dichas calibraciones deben efectuarse con tanques que contengan mezclas de gases certificadas como de alta precisión, especialmente preparadas para la calibración. Es una buena práctica mantener un tanque de gas calibrado que será usado de manera ocasional (durante años) a fin de proporcionar una validación de la exactitud de la calibración. Este tanque debe ser rotado antes de la medición a fin de minimizar el efecto de sedimentación de los gases. Además en los equipos de medición que utilizan la técnica respiración a respiración es necesaria la evaluación rutinaria del retraso de la señal de ambos gases. Para ello, se efectúa un cambio abrupto y simultáneo en la señal de ambos gases y se mide el tiempo transcurrido entre dicho cambio y la lectura de la señal en el analizador.

Asimismo, puede ser útil efectuar una calibración global del sistema mediante un simulador⁶² en los casos en que se disponga del mismo. Este tipo de equipos generan un flujo bidireccional mediante un pistón de precisión e inyectan en el sistema una mezcla de gases de calibración con concentraciones conocidas de O_2 y CO_2 . Ello permite la simulación de un \dot{V}_E , un $\dot{V}O_2$ y un $\dot{V}CO_2$ conocidos. La variabilidad de estas variables entre diferentes días no debe ser superior a $\pm 3\%$. Un aspecto a tener presente es que los equipos de simulación requieren la asunción de las correcciones por temperatura y humedad.

4.6.2. Calibraciones adicionales

La calibración del cicloergómetro⁶³⁻⁶⁵ debe efectuarse cada 6 meses y cada vez que se cambie su emplazamiento. Para los tapices rodantes⁵³ debe considerarse una sistemática de calibración de las mismas características, considerando la verificación de las revoluciones y la exactitud del grado de inclinación. Asimismo, los transductores de presión deben ser calibrados con un manómetro de mercurio.

Es aconsejable que, al menos, un sujeto sano miembro del laboratorio (que siga un régimen de comidas re-

gular) efectúe una prueba de esfuerzo a carga constante con una periodicidad semanal. Los valores de $\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$ y \dot{V}_E obtenidos en estado estacionario deben tener una reproducibilidad próxima al 7% en relación a los valores previos. La presencia de desviaciones significativas implicará la necesidad de reevaluar todo el sistema.

Un último método de calibración, que resulta laborioso pero puede considerarse un patrón de referencia, lo constituyen las mediciones de ventilación y gases respiratorios efectuados mediante la colección de bolsas de gas espirado mezclado. La precisión para las variables básicas $\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$ y \dot{V}_E debe ser de aproximadamente un 2-3%.

Sección 5

Realización de la prueba

5.1. Cualificación del personal

Las PECP deben ser realizadas por personal entrenado de forma adecuada y con conocimientos básicos sobre fisiología del ejercicio. Ello implica que los técnicos involucrados en la realización de las PECP deben tener conocimientos sobre las respuestas normales y anormales al ejercicio, así como deben estar entrenados en técnicas de resucitación cardiopulmonar. Las PECP deben ser supervisadas por un médico también entrenado al respecto. El grado de supervisión del sujeto que realiza la PECP vendrá determinado por su estado clínico y las características del protocolo de ejercicio. Es aconsejable que el médico esté presente durante la prueba o, al menos, en el área donde se efectúa la PECP y fácilmente asequible si es requerido. El médico tiene un papel importante en la evaluación del sujeto antes de la prueba y en la interpretación de los resultados.

5.2. Preparación del paciente

En el momento de la programación de la PECP, el paciente debe ser instruido sobre: el seguimiento de su medicación habitual, debe evitar comidas al menos 2 h antes de la prueba, y tiene que vestir de forma adecuada durante la realización de la prueba. Deben ser efectuados un breve cuestionario sobre medicaciones y un somero examen físico para descartar contraindicaciones o la programación de pacientes que presentan incapacidad de realización de la PECP por problemas mecánicos. Los resultados de las pruebas de función pulmonar (al menos de la espirometría forzada) deben ser asequibles.

Al llegar al laboratorio donde se efectuará la PECP, el paciente deberá recibir explicaciones sobre las características de la prueba y del equipo utilizado para su tranquilidad y máxima colaboración durante la misma. Se le informará sobre los objetivos y riesgos inherentes en la prueba. También recibirá instrucciones sobre cómo comunicarse con el personal durante la realización de la prueba y sobre los motivos de interrupción de la misma. Si es necesario deberá ser instruido sobre la forma de efectuar la ergometría e incluso podrá efectuar alguna práctica antes del inicio de la prueba hasta que se sienta confortable con el ergómetro. La altura del sillín del ci-

cloergómetro se ajustará a las características antropométricas del paciente. Asimismo, se le estimulará a efectuar las preguntas que considere pertinentes al inicio o durante la prueba con el objetivo de reducir su ansiedad.

Si se precisa muestreo de sangre arterial, después de realizar la prueba de Allen (para asegurar la existencia de una circulación colateral adecuada), se insertará un catéter en una arteria distal, preferentemente en la arteria radial del lado no dominante. La técnica de anestesia percutánea y las medidas necesarias para la colocación del catéter en condiciones estériles se describe con detalle en la bibliografía⁶⁶⁻⁶⁸. Asimismo, deben seguirse las normativas para la obtención y manejo de muestras de sangre arterial para el análisis de gasometría^{28,67,69-73}. Debe ser usado un sistema de flujo continuo que proporcione una infusión lenta de solución salina heparinizada, a fin de mantener la permeabilidad de la vía. Para evitar diluciones deben descartarse 2 ml de sangre antes de la muestra de gases arteriales.

Antes de la prueba, los electrodos de ECG deben ser colocados de forma cuidadosa. El esfigmomanómetro debe colocarse en uno de los brazos del paciente. La boquilla y las pinzas nasales deben ser ajustadas de forma que el paciente se sienta confortable y no se detecten fugas, ni se favorezca la acumulación de saliva en la boca durante la prueba. Las instrucciones para comunicarse con el personal durante la prueba (evaluación del malestar) o para interrumpir la prueba en caso de mareo o dolor opresivo retrosternal deben ser recordadas.

Durante la prueba el paciente será estimulado a efectuar un esfuerzo regular a la cadencia establecida y a prolongar la prueba hasta la limitación por síntomas. El establecimiento de una buena comunicación con el paciente permitirá conseguir un grado de esfuerzo adecuado.

Durante la recuperación el paciente mantendrá el pedaleo sin carga (o "caminará" con mayor lentitud en el tapiz rodante) durante al menos 2 min con el objetivo de evitar una hipotensión postejercicio. El mantenimiento o no de la boquilla y la realización de mediciones y la duración de las mismas durante la fase de recuperación dependerá de las características específicas de la PECP. Después de retirar la boquilla, se preguntará al paciente por los síntomas (tipo e intensidad) que determinaron la interrupción del ejercicio.

Si la prueba no aporta información adecuada para obtener conclusiones debido a problemas técnicos o de colaboración del paciente, se puede proceder a una segunda prueba después de unos 30-45 min de reposo.

Después de retirar el catéter arterial, deberá efectuarse una presión adecuada en la zona para evitar la hemorragia y la formación de hematoma. Dicha compresión puede ser necesaria durante 10-15 min. Posteriormente, se colocará un vendaje compresivo en la zona, que no se retirará durante las 6 h siguientes a la PECP.

5.3. Medidas de seguridad

La PECP se considera una prueba segura. Sin embargo, se han descrito riesgos y complicaciones relacionados con esta prueba^{55,74}. El riesgo relativo de complicaciones parece estrechamente relacionado con la enfermedad de base del paciente. El riesgo es particularmente elevado en el período inmediato postinfarto de miocardio y en los pacientes que presentan arritmias clasificadas como malignas. El buen juicio clínico es básico para decidir sobre las indicaciones y contraindicaciones de las PECP en pacientes con riesgo de complicaciones⁵⁴. En la tabla VI se detalla el listado de contraindicaciones absolutas y relativas.

Es importante que el personal que efectúa la PECP esté alerta sobre los episodios anormales que potencialmente pueden ocurrir durante la misma. Las indicaciones para interrumpir la prueba pueden ser síntomas, como dolor precordial agudo, palidez súbita, falta de coordinación, confusión mental y disnea grave, o signos, como: 1) depresión del segmento ST superior a 1 mV (menos específico en mujeres); 2) inversión de la onda T; 3) extrasístoles ventriculares polimórficos o muy frecuentes ($> 6 \text{ min}^{-1}$); 4) taquicardia ventricular; 5) descenso brusco de la presión arterial sistémica, a cifras inferiores a las de reposo o 20 mmHg en relación a la medición previa durante el ejercicio, y 6) desarrollo de hipertensión durante la prueba, presión sistólica superior a 250 mmHg o presión diastólica superior a 130 mmHg.

Si se produce la interrupción de la PECP por cualquiera de los motivos anteriores, el paciente debe permanecer en el laboratorio de ejercicio con monitorización de ECG hasta una completa solución del problema. La hospitalización o la realización de pruebas comple-

TABLA VI
Contraindicaciones absolutas de las pruebas de esfuerzo cardiopulmonar

Absolutas	Relativas (deben valorarse si el beneficio es mayor que el riesgo de ejercicio)
Infarto agudo de miocardio (3-5 días)	Estenosis de la arteria coronaria izquierda o su equivalente
Angina inestable	Estenosis valvular cardíaca moderada
Arritmias incontroladas que produzcan síntomas o compromiso hemodinámico	Alteraciones electrolíticas
Endocarditis activa	Hipertensión arterial no tratada (sistólica $> 200 \text{ mmHg}$, diastólica $> 120 \text{ mmHg}$)
Miocarditis o pericarditis aguda	Hipertensión pulmonar
Estenosis aórtica grave sintomática	Taquiarritmias o bradiarritmias
Fallo cardíaco incontrolado	Cardiomiopatía hipertrófica
Embolismo pulmonar agudo o infarto pulmonar	Impedimento mental que inhabilite la cooperación
Trastorno agudo de tipo no cardíaco que pueda afectar la realización de ejercicio o que se vea agravado por el ejercicio (p. ej., infección, fallo renal, tirototoxicosis)	Bloqueo atrioventricular grave
Trombosis de las extremidades inferiores	

mentarias son necesarios muy raramente. El equipo de resucitación cardiopulmonar debe ser asequible en el mismo laboratorio de ejercicio y el personal debe estar preparado para dispensar de forma transitoria cuidados intensivos al paciente.

Sección 6 Estrategias de interpretación

Esta sección recomienda una estrategia lógica para la interpretación de las PECP, y proporciona un análisis comparativo de diferentes valores de referencia disponibles. La información sobre las principales variables a considerar en el análisis de los resultados (tabla II) (definición, contenido, unidades y cálculo) se describe en el apéndice.

En la interpretación de las PECP existirá siempre un doble aspecto:

1. El análisis del problema clínico que motivó su indicación.
2. La evaluación del grado de intolerancia al ejercicio, así como la identificación de sus posibles causas.

Ambos aspectos forman parte de la secuencia de las actuaciones que se indican a continuación: *a)* identificación del problema clínico que motiva la realización de la PECP; *b)* elección del protocolo de ejercicio; *c)* asegurar una alta calidad de los resultados; *d)* presentación de los resultados en un formato apropiado; *e)* selección de unos valores de referencia adecuados para establecer modelos de respuesta anormal, y *f)* comparación con modelos característicos de ciertas enfermedades.

Es importante tener presente que las estrategias interpretativas basadas en la utilización de los valores numéricos puntuales ($\dot{V}O_2$ pico) de determinadas variables no son adecuadas. El proceso de toma de decisiones no debería basarse en una sola variable (aunque algunas son obviamente más importantes que otras), sino en el análisis integrado de conjuntos apropiados de variables, considerando su evolución durante la PECP.

Los protocolos de ejercicio incremental hasta el límite de tolerancia del ejercicio son los más utilizados en la clínica, aunque no los únicos que pueden emplearse (v. protocolos). Con frecuencia, se valoran de forma insuficiente los cambios fisiológicos durante el progreso desde el ejercicio submáximo hasta los niveles de ejercicio pico. A este respecto, la identificación de la zona de transición desde el ejercicio moderado al intenso (umbral láctico) es informativa y debería constituir uno de los objetivos en la estrategia de interpretación. Un elemento sumamente importante será la selección de valores de referencia adecuados para establecer si la respuesta al ejercicio es normal o no. Los datos disponibles sobre los valores de referencia y sus limitaciones actuales se discuten más adelante. La interpretación de las PECP debería basarse en el análisis gráfico y también numérico de las variables de interés (tabla II) que, en definitiva, indican la evolución del sujeto durante la prueba. Para el análisis gráfico se sugiere el modelo indicado en la figura 1. La inclusión de los valores de referencia

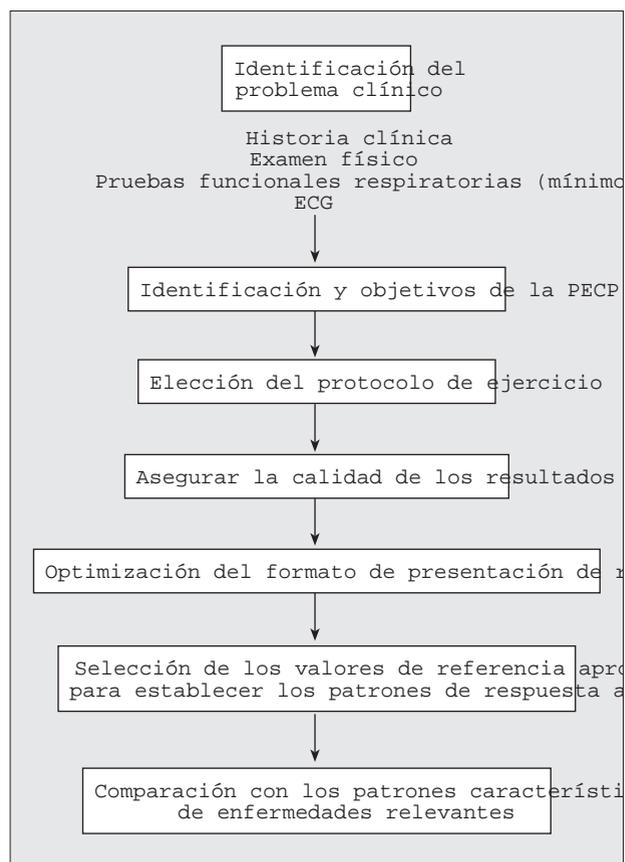


Fig. 6. Estrategia lógica para la realización de las pruebas de ejercicio cardiopulmonar (PECP) en la práctica clínica.

correspondientes puede ser incluso más ilustrativo si los valores predictivos correspondientes se detallan en cada uno de los gráficos. El siguiente paso será identificar los patrones de respuesta característicos de las diferentes enfermedades. El examen de los resultados de las PECP puede generar falsas interpretaciones si seguimos un diagrama de flujo no apropiado (fig. 6)²¹.

6.1. Evaluación de la tolerancia de ejercicio: la respuesta normal

Durante la PECP de tipo incremental con cicloergómetro se genera una demanda energética progresivamente creciente que implica a todos los sistemas involucrados en el transporte de oxígeno al músculo esquelético. Ello permite que, en un corto intervalo de tiempo, pueda examinarse un espectro relativamente amplio de intensidades de ejercicio dado que la masa muscular en ejercicio es importante. El ejercicio de extremidades inferiores con cicloergómetro, además de conseguir este objetivo, facilita la cuantificación de la carga externa de trabajo que se impone al organismo y, por tanto, el análisis de la relación $\dot{V}O_2$ -carga. La limitación del nivel máximo de ejercicio tolerado por un paciente puede deberse a dos situaciones: *a)* la demanda energética es superior a la capacidad máxima de transferencia y/o la utilización de O_2 celular ($\dot{V}O_{2m\acute{a}x}$), o *b)* la finalización del

ejercicio por síntomas debidos a la imposición de una carga de trabajo importante a un sistema fisiológico deteriorado ($\dot{V}O_2$ pico). En ambos casos, es frecuente la percepción de sensaciones dolorosas y agotamiento en las extremidades inferiores, falta de respiración o molestias torácicas. En los pacientes con enfermedad coronaria es característica la aparición de dolor torácico opresivo durante el ejercicio y en los pacientes con enfermedad vascular periférica, la claudicación de las piernas por dolor isquémico. La identificación de la limitación del ejercicio por el transporte/utilización del O_2 implica la demostración de una meseta en la relación $\dot{V}O_2$ -carga, difícilmente observable en pacientes o sujetos sanos no entrenados. Ello no constituye una limitación en la interpretación de las PECP.

La figura 1 propone una presentación gráfica de los resultados muy apropiada para la interpretación de las PECP. Los valores representados en la gráfica corresponden a un varón sedentario sano, de 42 años de edad. El propósito del estudio en este sujeto era la evaluación de la tolerancia del ejercicio para el diseño de un programa de entrenamiento físico. La radiografía de tórax, el electrocardiograma y las pruebas de función pulmonar en reposo fueron normales. La prueba de ejercicio se interrumpió debido a molestias en las extremidades inferiores. En esta figura se distinguen dos partes. La primera corresponde a los cuatro gráficos de la columna izquierda que se usan habitualmente para determinar de forma indirecta el umbral láctico. Cabe resaltar la consistencia en la estimación entre los diferentes gráficos, lo que nos permite identificar (línea discontinua vertical) el consumo de O_2 en que se produce la transición desde el ejercicio moderado al intenso (umbral láctico) (apéndice). La flecha pequeña en trazo continuo que aparece en cada gráfico nos indica el valor de referencia del umbral láctico (55% del $\dot{V}O_2$ pico de referencia) para el sujeto. La flecha con trazo discontinuo en el primer gráfico de la columna indica el valor de referencia de $\dot{V}O_2$ pico. Una segunda parte de la figura corresponde a los cuatro gráficos de la columna derecha. Dicha columna muestra dos aspectos sumamente importantes: el nivel de tolerancia de ejercicio ($\dot{V}O_2$ pico y W pico) en el primer gráfico, y la respuesta ventilatoria y cardiocirculatoria durante el ejercicio, en los gráficos siguientes.

En lo que respecta a la identificación del umbral láctico, el primer gráfico de la columna izquierda nos presenta la producción de CO_2 ($\dot{V}CO_2$) en relación con el consumo de oxígeno ($\dot{V}O_2$). Los detalles del cálculo del umbral láctico utilizando el método de *V-slope* se describen en el apéndice. Las ordenadas del segundo gráfico de esta columna corresponden a los equivalentes ventilatorios de O_2 ($\dot{V}_E/\dot{V}O_2$) y de CO_2 ($\dot{V}_E/\dot{V}CO_2$). En este caso, el umbral láctico se identifica como la región donde la relación $\dot{V}_E/\dot{V}O_2$ (símbolos abiertos) aumenta a causa de la respuesta de la \dot{V}_E a la acidosis metabólica. Ello se acompaña de un pequeño y simultáneo incremento en la relación $\dot{V}_E/\dot{V}CO_2$ (símbolos negros). El valor mínimo de la relación $\dot{V}_E/\dot{V}CO_2$ se sitúa entre 25 y 30 en sujetos jóvenes sanos. Unos valores mínimos más elevados pueden indicar hiperventilación o un espacio muerto (V_D/V_T) anormalmente alto.

Las ordenadas del tercer gráfico de la columna corresponden a las relaciones entre la presión parcial de O_2 al final de la espiración ($P_{ET}O_2$) (símbolos abiertos) y la presión parcial de CO_2 al final de la espiración ($P_{ET}CO_2$) (símbolos negros) en relación al $\dot{V}O_2$. El umbral láctico es identificado en la zona donde el $P_{ET}O_2$ aumenta mientras el $P_{ET}CO_2$ presenta una meseta. Finalmente, el gráfico inferior indica la relación entre el cociente del intercambio respiratorio ($RER = \dot{V}CO_2/\dot{V}O_2$) y el $\dot{V}O_2$. Este cociente (RER) es útil para evaluar la hiperhipoventilación aguda, aunque no es un índice tan claro como el *V-slope* para evaluar el umbral láctico. Los valores de $P_{ET}CO_2$ y el RER a ejercicio pico refleja, excepto en pacientes con insuficiencia respiratoria crónica grave, la intensidad de la actividad metabólica alcanzada al final de la prueba. El $\dot{V}O_2$ correspondiente al umbral láctico suele expresarse en forma de porcentaje del $\dot{V}O_2$ pico de referencia. Como se ha mencionado anteriormente, el umbral láctico en un sujeto activo sano se presenta aproximadamente en el 50% del $\dot{V}O_2$ pico de referencia, pero tiene una amplia variabilidad entre sujetos (intervalo de normalidad del 40-55%). El interés del umbral láctico se centra en su papel de identificación de la región transicional entre el ejercicio moderado e intenso. Se acepta que, en general, intervalos de trabajo inferiores al umbral láctico son sostenibles durante un período largo de tiempo.

El gráfico superior de la columna derecha ($\dot{V}O_2$ con relación a carga de trabajo) nos informa sobre la eficiencia del organismo durante el ejercicio (el valor normal de la pendiente es de 10 ml/min/W equivalente a una eficiencia de aproximadamente el 30%). El intervalo de referencia es de 8,5 a 11,5 ml/min/W. El pico esperado de ejercicio se representa por un asterisco y el $\dot{V}O_2$ pico de referencia y el valor pico de trabajo se indican mediante flechas. El segundo y cuarto gráfico de la columna de la derecha (\dot{V}_E frente a $\dot{V}CO_2$, y V_T frente a \dot{V}_E , respectivamente) caracterizan los aspectos de la respuesta ventilatoria durante el ejercicio submáximo y máximo. La línea discontinua del segundo gráfico indica la ventilación por minuto máxima de referencia (\dot{V}_E). Puede estimarse mediante la medición de la ventilación voluntaria máxima (VVM) o multiplicando el FEV_1 por un factor tal y como se describe en el apéndice. La reserva ventilatoria (VR), se calcula como el cociente entre la \dot{V}_E máxima teórica y la \dot{V}_E pico observada y se expresa como porcentaje. El último gráfico de esta columna presenta el volumen corriente (V_T) en relación con la \dot{V}_E . Se observa que el V_T aumenta proporcionalmente al incremento de $\dot{V}O_2$, y sólo al final de la prueba el aumento en la \dot{V}_E efectiva se consigue por un aumento proporcionalmente mayor en la frecuencia respiratoria.

Es aconsejable dimensionar la ordenada de este gráfico con una escala apropiada para representar la capacidad inspiratoria. Esta última (IC) refleja el valor máximo de V_T que puede alcanzar el sujeto.

En el ejemplo (fig. 1) estas dos gráficas (\dot{V}_E frente a $\dot{V}CO_2$, y V_T frente a \dot{V}_E) indican claramente que la capacidad ventilatoria no ha limitado el pico de $\dot{V}O_2$ en el individuo estudiado.

Finalmente, la relación entre la frecuencia cardíaca y el pulso de O₂ en relación al consumo de O₂ informa de las características de la respuesta hemodinámica al ejercicio. En el sujeto sano, la pendiente de la frecuencia cardíaca frente a $\dot{V}O_2$ corresponde a una línea recta que une el punto de frecuencia cardíaca y el $\dot{V}O_2$ basal (reposo) con la frecuencia cardíaca y el $\dot{V}O_2$ pico de referencia. De igual manera, el pulso de O₂ ($\dot{V}O_2$ /frecuencia cardíaca) aumenta de forma progresiva durante el ejercicio. El valor de pulso de O₂ pico de referencia se indican en el gráfico con una flecha. En los sujetos sanos no se observa una meseta del pulso de O₂ a valores altos de ejercicio. En este caso puede concluirse que la función cardiovascular fue normal. Tal y como se ha indicado en la sección de protocolos, el análisis del intercambio pulmonar de gases requiere la realización de una gasometría arterial con catéter. El pulsioxímetro tiene un papel importante en la monitorización del sujeto durante la prueba pero tiene limitaciones importantes para el diagnóstico.

6.2. Las pruebas de ejercicio cardiopulmonar en el proceso de toma de decisiones

Tal y como se ha descrito, el estado actual de desarrollo de las PECP proporciona elementos no solamente para analizar el grado de intolerancia al ejercicio, sino también para identificar los factores que ejercen un papel en la limitación de capacidad al ejercicio. Hay, sin embargo, todavía una potencialidad grande para el desarrollo de las estrategias de interpretación de las PECP

que puede ampliar mucho sus aplicaciones y utilidad clínica. Existen pocos estudios que evalúen la sensibilidad, la especificidad y el valor predictivo de las PECP para efectuar una distinción clara entre las diferentes entidades nosológicas. Sin embargo, aun más importante es mejorar nuestro conocimiento de los patrones de variables comúnmente utilizadas en la toma de decisiones de las condiciones patológicas bien identificadas (p. ej. el broncospasmo inducido por ejercicio, la evaluación preoperatoria de cirugía de resección de cáncer de pulmón, la evaluación de la fibrosis intersticial pulmonar, la evaluación de incapacidad, los programas de rehabilitación física, el trasplante de pulmón o corazón-pulmón, etc.). En este sentido un cambio progresivo orientado hacia la medicina basada en la evidencia debe ofrecer nuevas perspectivas⁷⁶ a la interpretación de las PECP. Ello debe proporcionar respuestas a preguntas clínicamente relevantes. Debería recordarse, sin embargo, que la identificación del diagnóstico no es el único objetivo de las PECP, ni probablemente el más importante. La evaluación de la intolerancia al ejercicio es la meta común en todo el ejercicio cardiopulmonar incluso en esas circunstancias donde este aspecto no está definido como el propósito primario en la indicación de las PECP.

6.3. Valores de referencia

La selección de valores de referencia adecuados constituye uno de los aspectos básicos de la interpretación de las PECP. Zeballos et al⁷⁷ han efectuado una re-

TABLA VII
Características de las principales ecuaciones de predicción

Autor	Ecuaciones	Población	Sujetos	Equipamiento
Hansen et al	♂ $\dot{V}O_2$ (ml/min) 50,72 - 0,372 E) P ♀ $\dot{V}O_2$ pico (ml/min) (22,78 - 0,17E) (P + 43)	77 V 34-74 años	Trabajadores de astilleros	Cicloergómetro Respiración a respiración Incrementos de 10-30 W
Jones et al*	♂ $\dot{V}O_2$ (ml/min) 0,046A - 0,021E - 4,31 ♀ $\dot{V}O_2$ (ml/min) 0,046A - 0,021E - 4,93 ♂ W (kpm/min) 20,4A - 8,74E - 1909 ♀ W (kpm/min) 20,4A - 8,74E - 2197	50 V/50 M 15-71 años	Voluntarios	Cicloergómetro Caja de mezclas 10 l Incrementos de 100 kpm/min
Blackie et al	♂ $\dot{V}O_2$ pico (l/min) 0,0142A - 0,0494E + 0,00257P + 3,015 ♀ $\dot{V}O_2$ pico (l/min) 0,0142A - 0,0115E + 0,00974P + 0,651 ♂ W (kpm/min) 6,1A - 26,1E + 0,04P + 1,704 ♀ W (kpm/min) 7,4A - 13,0E + 2,78P + 52	47 V/81 M > 55 años	Voluntarios	Cicloergómetro Caja de mezclas 10 l Incremento de 100 kpm/min
Fairbarn et al	♂ $\dot{V}O_2$ pico (l/min) 0,023A - 0,031E + 0,0117P - 0,332 ♀ $\dot{V}O_2$ pico (l/min) 0,0158A - 0,027E + 0,00899P + 0,207	111 V/120 M 20-80 años	Voluntarios	Cicloergómetro Caja de mezclas 8,5 l Incrementos de 100 kpm/min
Neder et al	♂ $\dot{V}O_2$ pico (l/min) ecuaciones por rangos de edad ♀ $\dot{V}O_2$ pico (l/min) ecuaciones por rangos de edad ♂ W (kpm/min) 1,36A - 1,781E + 0,65P - 45,4 ♀ W (kpm/min) 0,96A - 1,190 E + 28,1	60 V/60 M 20-80 años	Voluntarios	Cicloergómetro Respiración a respiración Incrementos de 10-30 W

E: edad en años; A: altura en cm; P: peso en kg; V: varones; M: mujeres.

Hansen et al^{21,78} sugieren ecuaciones alternativas para aquellos sujetos que presenten diferencias entre el peso actual e ideal; Jones et al*⁷⁹ ecuación simplificada. Estos autores proporcionan ecuaciones de predicción para la frecuencia cardíaca y el pulso de O₂ a ejercicio pico; Fairbarn et al⁸³ proporcionan ecuaciones para la frecuencia cardíaca a ejercicio submáximo y pico. Neder et al⁸⁴ proporcionan ecuaciones completas por rangos de edad, tanto en ejercicio pico como en la progresión durante la prueba.

visión exhaustiva de la información disponible sobre la respuesta al ejercicio en sujetos sanos^{21,22,78-90}. Para el presente documento, hemos seleccionado 6 estudios^{78,79,81-85} que reúnen las características necesarias para ser utilizados como valores de referencia en la clínica. Sin embargo, Blackie et al⁸² estudiaron un intervalo de edades relativamente limitado (de 55 a 80 años) y Bruce et al⁸⁵ aportan información obtenida en un grupo de sujetos con un alto grado de condicionamiento físico, estudiados mediante tapiz rodante. Por tanto, los estudios de valores de referencia potencialmente aplicables a sujetos sedentarios evaluados con cicloergómetro con ecuaciones de predicción para $\dot{V}O_2$ y carga a ejercicio máximo se reducen a 4^{78,79,83,84}. Las características básicas de dichos estudios se resumen en la tabla VII. Los valores de referencia de $\dot{V}O_{2\text{máx}}$ estimados con las ecuaciones de Jones et al⁷⁹ son semejantes a los de Hansen et al^{21,78} tanto en varones como en mujeres para diferentes edades. Sin embargo, los valores estimados por Fairbairn et al⁸³ son sistemáticamente más altos en ambos sexos. Cabe señalar, que las similitudes entre Jones et al⁷⁹ y Hansen et al^{21,78} son menos evidentes cuando se comparan diferentes pesos y tallas. Excepto para la frecuencia cardíaca en el estudio de Fairbairn et al⁸³, existen pocos datos en la bibliografía sobre el perfil de la respuesta al ejercicio en sujetos sanos para otras variables de interés. Además, no existen ecuaciones de predicción para las variables más importantes (tabla II) obtenidas en un mismo grupo de sujetos sedentarios, lo cual puede facilitar una falta de consistencia interna al utilizar ecuaciones de predicción para la interpretación de las PECP. Este último aspecto queda subsanado por el conjunto de ecuaciones propuestas por Neder et al⁸⁴, que no sólo analiza el pico de ejercicio sino la progresión durante la prueba en sujetos sedentarios sanos seleccionados de forma aleatoria a partir de población general. El problema de dicho estudio es que están realizadas en población multirracial de Brasil. Sin embargo, la aplicación de las ecuaciones en un grupo limitado de anglosajones proporciona resultados interesantes.

Se considera que deberían estimularse estudios multicéntricos a escala internacional dirigidos a obtener un grupo de ecuaciones de predicción de las principales variables de las PECP en una prueba de tipo incremental con cicloergómetro, para estimar tanto los valores de ejercicio pico como el perfil de respuesta durante el ejercicio submáximo. Ello debería efectuarse utilizando PECP estandarizadas y siguiendo una programa de control de calidad riguroso. Este último tendría como objetivo evaluar la exactitud de las mediciones y controlar la variabilidad intra e interlaboratorios. En subgrupos de sujetos de referencia, sería de interés el análisis comparativo de los resultados del protocolo incremental con cicloergómetro con otras formas de ejercicio (protocolo incremental con tapiz rodante, ejercicio con cicloergómetro a carga constante). Consideramos que un proyecto de estas características representaría un avance cualitativo en la interpretación de las PECP. En estos momentos, sin embargo, un paso aconsejable sería estudiar un pequeño grupo de sujetos sedentarios sanos (n = 15, de

cada sexo), para evaluar el conjunto de ecuaciones de predicción que mejor se ajusten a las características específicas de cada laboratorio. Las ecuaciones propuestas por Neder et al⁸⁴ deberían constituir uno de los referentes a considerar, dadas las razones expuestas anteriormente.

Apéndice

Unidades SI

Estas unidades "Système International d'Unités"^(86,87) son el resultado de más de cien años de cooperación internacional en el desarrollo de un sistema de unidades de medida universalmente aceptado. Las SI nacieron del desarrollo del sistema métrico decimal, de uso muy extendido en todo el mundo. Sin embargo, a pesar de la aprobación del Acta de Conversión métrica en el Congreso de los Estados Unidos de Norteamérica (EE.UU.) (1975) que autorizaba el uso de las unidades SI; este sistema de unidades tiene poco impacto en los EE.UU. Formalmente, las SI han sido adoptadas por todos los miembros de la Unión Europea desde hace 20 años. En la tabla VIII se indican ambas nomenclaturas y los factores de conversión entre las unidades SI y las variables tradicionales utilizadas en este documento.

Variables: definiciones y cálculos

Trabajo mecánico

Carga de trabajo (en W). Indica la cantidad de trabajo realizado por unidad de tiempo. Trabajo ($\text{kg/s}^2/\text{m}^2$, julios), de hecho, es la cuantificación física de la fuerza ($\text{kg/s}^2/\text{m}$, newton) sobre una masa (kg) que causa su cambio de posición (distancia expresada en metros). La carga de trabajo se mide en vatios ($\text{kg/s}^2/\text{m}^2$, o julios/s).

Intercambio de gases

Consumo de O_2 ($\dot{V}O_2$ en ml/min). Es la diferencia de flujo de O_2 entre el gas inspirado y espirado, expresado en l/min (en condiciones STPD, véase más adelante). Durante condiciones de estado estacionario (*steady-state*), la demanda de O_2 y el consumo de O_2 (cantidad de O_2 usado por el metabolismo corporal durante un período de tiempo) son equivalentes.

$$\dot{V}O_2 = \dot{V}_I \cdot F_{I}O_2 - \dot{V}_E \cdot F_{E}O_2$$

o si sólo el volumen minuto (\dot{V}_E) es calculado

$$\dot{V}O_2 = (F_{I}O_2 \cdot [F_{E}N_2 / F_{I}N_2] - F_{E}O_2) \cdot \dot{V}_E$$

donde \dot{V}_E corresponde a la ventilación minuto y $F_{I}O_2$ y $F_{E}O_2$ corresponde a la concentración parcial de O_2 inspirado y espirado y $F_{I}N_2$ y $F_{E}N_2$ son las concentraciones de N_2 inspirado y espirado.

TABLA VIII
Unidades tradicionales frente a unidades internacionales (SI)

	Unidades tradicionales (T)		Unidades internacionales (SI)		Factor de conversión
	Nombre	Unidades	Nombre	Unidades	
Trabajo mecánico	Trabajo	kg/m/min o kp/m/min	Watts	W	0,163
Ventilación	$\dot{V}O_2$	ml/min	$\dot{i}O_2$	mmol/min	22,40
	$\dot{V}CO_2$	ml/min	$\dot{i}CO_2$	mmol/min	22,26
	RER	–	RER	–	1,0
	\dot{V}_E	l/min	\dot{V}_E	l/min	1,0
	V_T	ml o l	V_T	ml o l	1,0
	f	min	f	min	1,0
	V>R	–	VR	–	1,0
Gases respiratorios en sangre	P_aO_2	min	P_aO_2	kPa	0,1333
	P_aCO_2	min	P_aCO_2	kPa	0,1333
	A_aPO_2	min	A_aCO_2	kPa	0,1333
	V_D/V_T	–	V_D/V_T	–	1,0
Cardiovascular	FC	min	FC	min	1,0
	HRR	–	HRR	–	1,0
	$\dot{V}O_2/HR$	ml	$\dot{i}O_2/HR$	mmol	22,4
Estado ácido-base	Exceso de base o bicarbonato (lactato)	mEq/l	BE (lactato)	mmol/l	1,0

$\dot{V}O_2$, consumo de O_2 ; $\dot{V}CO_2$, producción de CO_2 ; cociente respiratorio, RER; ventilación minuto, \dot{V}_E ; volumen corriente, V_T ; frecuencia respiratoria, f; reserva ventilatoria, VR; porcentaje de espacio muerto en relación al volumen corriente, V_D/V_T ; frecuencia cardíaca, FC; reserva de frecuencia cardíaca, HRR; concentración de lactato en sangre, (lactato); factores de conversión, unidades SI a unidades tradicionales (unidades SI/unidades tradicionales).

Producción de CO_2 ($\dot{V}CO_2$, en ml/min). En ausencia de dióxido de carbono inspirado, es el flujo de dióxido de carbono exhalado desde el organismo a la atmósfera, expresado en condiciones STPD (véase más adelante). En condiciones de estado estacionario, la producción de CO_2 es igual que la producción corporal de CO_2 . El valor de la producción de CO_2 se halla calculando el volumen total de CO_2 exhalado en un período de tiempo.

$$\dot{V}O_2 = F_E CO_2 \cdot \dot{V}_E$$

donde $F_E CO_2$ corresponde a la concentración parcial de CO_2 espirado.

Cociente de intercambio respiratorio (RER o R, sin unidades). Es el cociente entre la eliminación pulmonar de CO_2 y la captura pulmonar de O_2 . El RER refleja no sólo la actividad metabólica tisular, sino también los cambios en la reserva corporal de los gases respiratorios (O_2 y más importante el CO_2). El cociente respiratorio (RQ) es la relación entre la producción de CO_2 y el consumo de O_2 tisular y refleja el tipo de sustrato metabólico. Durante la hiperventilación, RER excede al RQ porque, desde la reserva corporal se exhala CO_2 adicional, mientras que el RER es menor que el RQ durante la hipoventilación transitoria cuando el CO_2 es retenido en las reservas corporales.

Umbral láctico (Lactic Threshold [LT], ml/min). Se define como el consumo de O_2 durante el ejercicio en que se genera un incremento sostenido de los niveles sanguíneos de ácido láctico. El significado clínico del LT y las limitaciones de su identificación e interpreta-

ción en pacientes con enfermedades respiratorias están indicadas en el texto (Sección 4).

Mediciones directas del umbral láctico (LT)

El perfil de los niveles sanguíneos de ácido láctico ([La]) en relación con el $\dot{V}O_2$ puede no constituir la estimación más sensible del LT, dado que la identificación del punto de inflexión que indica un aumento brusco del [La] durante el ejercicio intenso puede ser problemática en determinados casos. Ello puede mejorarse mediante la expresión de los resultados como:

1. Cociente de las concentraciones de ácido láctico/ácido pirúvico en sangre arterial.
2. La transformación logarítmica de la concentración de ácido láctico (o de bicarbonato estándar).

Estimación del umbral láctico por métodos no invasivos

Se describirán el método del equivalente ventilatorio y el método *V-slope*^{88,89}. Tal como se indica en la Sección 4 (fig. 1), la discriminación del LT mejora de forma sustancial cuando la estimación se efectúa utilizando un conjunto de variables (en vez de un sólo parámetro) como se indica en los cuatro gráficos de la columna izquierda de la mencionada figura.

1. Método del equivalente ventilatorio

La hiperventilación compensatoria de la acidosis metabólica durante el ejercicio intenso de tipo incremental suele ocurrir coincidiendo con el aumento brusco de la

concentración sanguínea de ácido láctico (y el descenso del bicarbonato estándar) [La]. Para medir este fenómeno, se programan incrementos de carga de forma relativamente lenta, cada 3-4 min. En estas circunstancias, podemos identificar que la ventilación (\dot{V}_E) inicia un incremento más rápido que la producción de CO_2 ($\dot{V}\text{CO}_2$) y $\dot{V}\text{O}_2$. Ello determina el aumento de ambos equivalentes ventilatorios de O_2 y CO_2 ($\dot{V}_E / \dot{V}\text{O}_2$, $\dot{V}_E / \dot{V}\text{CO}_2$) y por tanto una reducción de la PCO_2 arterial. Sin embargo, la respuesta hiperventilatoria de carácter compensador queda atenuada cuando el incremento de cargas durante el protocolo de ejercicio se efectúa de forma más rápida, tal como es habitual en la clínica [1]. Por otra parte, determinados pacientes (con baja sensibilidad de los receptores periféricos o con resistencia pulmonar elevada) pueden presentar una incapacidad para desarrollar la respuesta hiperventilatoria típica descrita en sujetos normales. En ambas condiciones, puede resultar difícil la identificación del LT mediante la respuesta ventilatoria durante el ejercicio. Para subsanar este problema se desarrolló el método de la pendiente de $\dot{V}\text{O}_2$ (Método del "V-slope").

2. Método de la pendiente de $\dot{V}\text{CO}_2$ (Método del "V-slope")

Con este procedimiento, el umbral láctico (LT) es identificado por medio de las relaciones entre el $\dot{V}\text{CO}_2$ y $\dot{V}\text{O}_2$. El mayor incremento de la producción de CO_2 en relación al consumo de O_2 por encima del LT, evidencia un incremento (esencialmente lineal) de la pendiente $\dot{V}\text{CO}_2$ en relación al $\dot{V}\text{O}_2$ (S_2) (fig. 4). En dicha figura, la intersección de S_1 y S_2 nos indica el LT. En aquellos casos en que la identificación de S_1 y la S_2 pueda resultar problemática, y por tanto su intersección de difícil identificación, se asume una pendiente de 1.0 para S_1 y se estima el umbral como aquella zona de la relación $\dot{V}\text{CO}_2$ frente a $\dot{V}\text{O}_2$ en que la curva se separa de S_1 ⁸⁹.

Ventilación

Ventilación minuto (en l/min). Es el volumen de gas espirado (\dot{V}_E) o inspirado (\dot{V}_I) en un minuto, expresado en condiciones BTPS (vease más adelante).

Volumen corriente (VT, en ml o l). Volumen de gas espirado (o inspirado) durante cada ciclo respiratorio. Se calcula como el cociente entre la ventilación minuto (l/min) y la frecuencia respiratoria (min).

Frecuencia respiratoria (f, en min). Número de ciclos respiratorios por minuto. Se calcula como la relación entre el número de ciclos respiratorios completos durante un minuto en relación con el tiempo total del ciclo respiratorio expresados en segundos.

Reserva ventilatoria (RV, sin unidades). Diferencia entre la ventilación máxima teórica (VMT) (estimada como ventilación voluntaria máxima, [VVM] y la ventilación minuto medida en ejercicio pico, o expresada como porcentaje de VVM. Se calcula como:

$$\text{RV, \%} = ([\text{VVM} - \text{E pico}] / \text{VVM}) * 100$$

Representa el potencial de incremento adicional que tiene la ventilación durante el ejercicio máximo (o pico).

Gases respiratorios en sangre

PO_2 arterial (PaO_2 , en mmHg). Presión parcial de oxígeno en sangre arterial.

PCO_2 arterial (PaCO_2 , en mmHg). Presión parcial de dióxido de carbono en sangre arterial.

Diferencia alveoloarterial PO_2 (AaPO_2 , en mmHg). Diferencia entre la presión parcial de O_2 alveolar ideal (PAO_2) y la PaO_2 medida. La AaPO_2 se calcula usando la ecuación del gas alveolar descrita en la Sección 1:

$$\text{AaPO}_2 = [\text{P}_1\text{O}_2 - \text{PaCO}_2/\text{RER} + (\text{PaCO}_2 * \text{F}_1\text{O}_2 * (1 - \text{RER})/\text{RER}] - \text{PaO}_2$$

Ecuación simplificada:

$$\text{AaPO}_2 = [\text{P}_1\text{O}_2 - \text{PaCO}_2/\text{RER}] - \text{PaO}_2$$

donde PaO_2 y PaCO_2 son la PO_2 y PCO_2 arterial, respectivamente, y RER es el porcentaje de intercambio respiratorio ($\text{RER} = \dot{V}\text{CO}_2 / \dot{V}\text{O}_2$)⁹⁰. La AaPO_2 refleja la eficiencia del pulmón como intercambiador de O_2 . Sin embargo, puede estar influenciado por cambios en el gasto cardíaco o en la ventilación minuto. En la clínica, se utiliza la forma simplificada para el cálculo de la AaPO_2 , dado que el valor $(\text{PaCO}_2 * \text{F}_1\text{O}_2 * [1 - \text{RER}]/\text{RER})$ es próximo a cero.

Espacio muerto del volumen corriente (V_D/V_T , sin unidades). Porción de volumen corriente (V_T) ventilando un espacio muerto fisiológico (V_D). Es un índice de la eficiencia de los pulmones como intercambiador de CO_2 . Se calcula como el cociente de la diferencia entre PaCO_2 y el PCO_2 expirado mixto ($\text{PaCO}_2 - \text{P}_E\text{CO}_2$).

$$\text{V}_D/\text{V}_T, \% = ([\text{PaCO}_2 - \text{P}_E\text{CO}_2] / \text{PaCO}_2) * 100$$

Cardiovascular

Frecuencia cardíaca (FC, en min). Número de latidos cardíacos por minuto. Se calcula como la relación entre el número de latidos completos durante un minuto en relación con el tiempo total de un ciclo cardíaco.

Reserva cardíaca (HRR, %). Relación entre la diferencia de la frecuencia cardíaca teórica más alta medida a ejercicio máximo y el pico de frecuencia cardíaca máxima medida en relación con la frecuencia cardíaca teórica durante el ejercicio máximo, expresada en tanto por ciento:

$$\text{HRR} = ([\text{Máxima FC teórica} - \text{FC pico}] / \text{máxima FC teórica}) * 100$$

Pulso de O_2 ($\dot{V}\text{O}_2 / \text{FC}$, en ml). Corresponde al consumo de O_2 por ciclo cardíaco. El pulso de O_2 es numéricamente igual al producto del volumen cardíaco y la diferencia de contenido arteriovenoso de O_2 . Al tratarse de una variable compleja es la que interviene la extracción tisular de O_2 su interpretación clínica debe efectuarse con gran cautela.

Equilibrio ácido-base

pH arterial (pHa). Es la inversa del logaritmo decimal de la concentración de hidrogeniones [H^+] en sangre arterial. Éste indica el equilibrio ácido-base global (componentes respiratorio y metabólico) de la sangre arterial.

PCO₂ arterial. Presión parcial de CO₂ en sangre arterial, refleja la contribución del componente respiratorio en el equilibrio ácido-base.

Exceso de base (EB, en mEq/l). Indica la contribución del componente metabólico ácido-base en el equilibrio ácido-base de la sangre. El EB se calcula mediante la ecuación Henderson-Hasselbach. La concentración de hemoglobina y la saturación de oxihemoglobina influyen en el cálculo de EB al modular la capacidad de tampón de la sangre. La información proporcionada por esta variable es similar a la que se obtienen estimando el [CO₃H] estándar.

Condiciones de las mediciones

STPD. Medición del volumen de gas en condiciones estándar de temperatura (0 °C), presión atmosférica (760 mmHg) y sin vapor de agua (PH₂O = 0 mmHg).

BTPS. Medición del volumen de gas a temperatura corporal (37 °C), presión atmosférica ambiental y vapor de agua a temperatura corporal (PH₂O = 47 mmHg).

BIBLIOGRAFÍA

- Roca J, Whipp BJ, Agustí AGN, Anderson SD, Casaburi R, Cotes JE et al. Clinical Exercise Testing. Eur Resp Monogr 1997; 2: Mon 6.
- Agostoni PG, Smith DD, Schoene RB, Robertson HT, Butler J. Evaluation of breathlessness in asbestos workers. Result of exercise testing. Am Rev Respir Dis 1987; 135: 812-816.
- Oren A, Sue DY, Hansen JE, Torrance DJ, Wasserman K. The role of exercise testing in impairment evaluation. Am Rev Respir Dis 1987; 135: 230-235.
- Mahler DA, Horowitz MB. Clinical evaluation of exertional dyspnea. Clin Chest Med 1994; 15: 259-269.
- Agustí C, Xaubet A, Roca J, Agustí AGN, Rodríguez-Roisin R. Interstitial pulmonary fibrosis with and without associated collagen vascular disease: results of a 2 years follow-up. Thorax 1992; 47: 1035-1040.
- Risk C, Epler G, Gaensler EA. Exercise alveolar-arterial oxygen pressure difference in interstitial lung disease. Chest 1984; 85: 69-74.
- Spiro SG, Dowdeswell IRG, Clark TJH. An analysis of submaximal exercise responses in patients with sarcoidosis and fibrosing alveolitis. Br J Dis Chest 1981; 75: 169-180.
- Dean NC, Brown JK, Himelmann RB, Doherty JJ, Gold WM, Stulgams MS. Oxygen may improve dyspnea and endurance in patients with chronic obstructive pulmonary disease and only mild hypoxemia. Am Rev Respir Dis; 1992: 941-945.
- Weber KT, Janicki JSM. Determination of aerobic capacity and the severity of chronic cardiac and circulatory failure. Circulation 1987; 76: 40-45.
- Nixon PA, Orenstein DM, Kelsey SF, Doershuk CF. The prognostic value of exercise testing in patients with cystic fibrosis. N Engl J Med 1992; 327: 1785-1788.
- Morice RC, Peters RJ, Ryan MB, Putman MB, Ali MK, Roth JA. Exercise testing in the evaluation of patients at high risk for complications from lung resection. Chest 1992; 101: 356-361.
- Nickoladze GD. Functional results of surgery for bullous emphysema. Chest 1992; 101: 119-122.
- Cooper JD, Trulock EP, Triantafyllou AN, Patterson GA, Pohl MS, Deloney PA et al. Bilateral pneumectomy (volume reduction) for chronic obstructive pulmonary disease. J Thorac Cardiovasc Surg 1995; 109: 106-119.
- Celli BR. Pulmonary rehabilitation in patients with COPD. Am J Respir Crit Care Med 1995; 152: 861-864.
- Güell R, De Lucas P. Rehabilitación respiratoria. Recomendaciones SEPAR, 1999.
- ATS Statement. Evaluation of impairment/disability secondary to respiratory disorders. Am Rev Respir Dis 1986. 133: 1205-1209.
- 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: 747-751.
- Mancini DM, Eisen H, Kussmaul W, Mull R, Edmunds LH, Wilson JR. Value of peak exercise oxygen consumption for optimal timing of cardiac transplantation in ambulatory patients with heart failure. Circulation 1991; 83: 778-786.
- Levy RD, Ernst P, Levine SM, Shennib H, Anzueto A, Bryan CL et al. Exercise performance after lung transplantation. J Heart Lung Transplant 1993; 12: 27-33.
- McGavin CR, Gupta SP, McHardy GJR. Twelve minute walking test for assessing disability in chronic bronchitis. Br Med J 1976; 1: 822-823.
- Wasserman K, Hansen JE, Sue DY, Whipp BJ, Casaburi R. Principles of exercise testing and interpretation (2.^a ed.). Filadelfia: Lea & Febiger, 1994.
- Weisman IM, Zeballos RJ. En: Weisman I, Zeballos RJ, editores. Clinical exercise testing, Clinical Chest in Medicine. Filadelfia: W.B. Saunders Co., 1994; 173-451.
- Jones NL. Clinical exercise testing (3.^a ed.). Filadelfia: W.B. Saunders, 1988.
- Balke B, Ware RW. An experimental study of 'physical fitness' of Air Force personell. US Armed Forces Med J, 1959.
- Mador MJ, Rodis A, Magalang UJ. Reproducibility of borg scale measurements of dyspnea during exercise in patients with COPD. Chest 1995; 107: 1590-1597.
- Muza SR, Silverman MT, Gilmore GS, Hellerstein HK, Kelsen SG. Comparison of scales used to quantitate the sense of effort to breath in patients with chronic obstructive pulmonary disease. Am Rev Respir Dis. 1990; 141: 909-913.
- Ortega F, Montemayor T, Morales MA, Ayerbe R, Hernández F, Castillo J. Variabilidad de la medida de la sensación de disnea durante el esfuerzo en pacientes con enfermedad pulmonar obstructiva crónica. Arch Bronconeumol 1993; 29: 7-11.
- Hansen JE. Participant responses to blood gas proficiency testing reports. Chest 1992; 101: 1240-1244.
- Clark JS, Votteri B, Arriagno RL, Cheung P, Eichhorn JH, Fallat RJ et al. Noninvasive assessment of blood gases. Am Rev Respir Dis 1992; 145: 220-232.
- Sterk PJ, Fabbri LM, Quanjer PHH, Cockcroft DW, O'Byrne PM, Anderson SD et al. Airways responsiveness. Standardized challenge testing with pharmacological physical and sensitizing in adults. Eur Respir J 1993; 6 (Supl 16): 53-83.
- Rubin LJ. Current concepts: primary pulmonary hypertension. N Engl J Med 1997; 336: 111-117.
- Kessler R. Predictive factors of hospitalization for acute exacerbation in a series of 64 patients with chronic obstructive pulmonary disease. Am J Resp Crit Care Med 1999; 159: 158-164.
- Bruce RA, Kusumi MS, Hosmer D. Maximal oxygen intake and nomographic assessment of functional aerobic impairment in cardiovascular disease. Am Heart J 1973; 85: 546-562.
- Hermansen L, Saltin B. Oxygen uptake during maximal treadmill and bicycle exercise. J Appl Physiol 1969; 26: 1-31.
- McArdle WD, Katch RI, Pechar GS. Comparison of continuous and discontinuous treadmill and bicycle tests for max VO₂. Med Sci Sports Exerc 1973; 5: 156-160.
- McKay GA, Banister EW. A comparison of maximum oxygen uptake determination of bicycle ergometry at various pedaling frequencies and by treadmill running at various speeds. Eur J Appl Physiol 1976; 35: 191-200.
- Koyal SN, Whipp BJ, Huntsman D, Bray GA, Wasserman K. Ventilatory responses to the metabolic acidosis of treadmill and cycle ergometry. J Appl Physiol 1976; 40: 864-867.
- Whipp BJ. The Physiological and Energetic Basis of Work Efficiency. En: Bray GA, editor. Obesity in perspective. Washington DC: U.S. Govt. Printing Office 1976; 121-126.
- Wasserman K, Whipp BJ. Exercise physiology in health and disease (State of the Art). Am Rev Respir Dis 1975; 112: 219-249.
- Whipp BJ, Bray GA, Koyal SN, Wasserman K. Exercise energetics and respiratory control in man following acute and chronic elevation of calorie intake. En: Bray GA, editor. Obesity in perspective. Washington DC: U.S. Govt. Printing Office, 1976; 157-163.

41. Beaver WL, Wasserman K, Whipp BJ. On-line computer analysis and breath-by-breath graphical display of exercise function tests. *J Appl Physiol* 1973; 34: 128-132.
42. Noguchi H, Ogushi Y, Yoshiya N, Itakura N, Yamabayashi H. Breath-by-breath VCO₂ and VO₂ require compensation for transport delay and dynamic response. *J Appl Physiol* 1982; 52: 79-84.
43. Yamamoto Y, Takei Y, Mokushi K, Morita H, Mutoh Y, Miyashita M. Breath-by-breath measurement of alveolar gas exchange with a slow-response gas analyser. *Med Biol Engl Comput* 1987; 25: 141-146.
44. Beaver WL, Lamarra N, Wasserman K. Breath-by-breath measurement of true alveolar gas exchange. *J Appl Physiol* 1981; 51: 1662-1675.
45. Sue DY, Hansen JE, Bliasi M, Wasserman K. Measurement and analysis of gas exchange during exercise using a programmable calculator. *J Appl Physiol* 1980; 49: 456-461.
46. Lamarra N, Whipp BJ. Measurement of pulmonary gas exchange. In: Maud PJ, Foster C, editores. *Physiological assessment of human fitness*. Champaign, IL, USA: Human Kinetics, 1995; 19-35.
47. Wilmore JH, Costill DL. Adequacy of the Haldane transformation in the computation of exercise VO₂ in man. *J Appl Physiol* 1973; 35: 85-98.
48. Swanson GD. Breath-by-breath considerations for gas exchange kinetics. En: Ceretilli P, Whipp BJ, editores. *Exercise bioenergetics and gas exchange*. Amsterdam: Elsevier/North Holland, 1980; 211-222.
49. Quanjer PH, Tammeling GJ, Cotes JE, Pedersen OF, Peslin R, Yernault JC. Lung volumes and forced ventilatory flows. Report working party: standardization of lung function testing. *Eur Respir J* 1993; 6: 5-40.
50. American Thoracic Society. Standardization of spirometry: 1994 update. *Am J Respir Crit Care Med* 1995; 152: 1107-1136.
51. Porszasz J, Barstow TJ, Wasserman L. Evaluation of a symmetrically disposed Pitot tube flowmeter for measuring gas flow during exercise. *J Appl Physiol* 1994; 77: 2659-2665.
52. Mogue LR, Rantala B. Capnometers. *J Clin Monitoring* 1988; 4: 115-121.
53. American Heart Association Subcommittee on Rehabilitation Target Activity Group (Hellerstein HKC). Specification for exercise testing equipment. *Circulation* 1979; 59: A849-A854.
54. Fletcher GF, Froelicher VF, Hartley LH, Haskell WL, Pollack ML. Exercise standards. A statement for health professionals from the American Heart Association. *Circulation* 1990; 82: 2286-2322.
55. American Heart Association. Exercise Standards. *Circulation* 1995; 91: 580-615.
56. Ries AL, Farrow JT, Clausen JL. Accuracy of two ear oximeters at rest and during exercise in pulmonary patients. *Am Rev Respir Dis* 1985; 132: 685-689.
57. Carlin BW, Clausen JL, Ries AL. The use of cutaneous oximetry in the prescription of long-term oxygen therapy. *Chest* 1988; 94: 239-241.
58. Orenstein DM, Curtis SE, Nixon PA, Hartigan ER. Accuracy of three oximeters during exercise and hypoxemia in patients with cystic fibrosis. *Chest* 1993; 104: 1187-1190.
59. Carlin BW, Clausen JL, Ries AL. The effects of exercise testing on the prescription of oxygen therapy. *Chest* 1994; 106: 361-365.
60. Hansen JE, Casaburi R. Validity of ear oximeter in clinical exercise testing. *Chest* 1987; 91: 333-337.
61. Borg GAV. Physiological bases of perceived exertion. *Med Sci Sport Med* 1982; 14: 377-381.
62. Huszczuk A, Whipp BJ, Wasserman K. A respiratory gas exchange simulator for routine calibration in metabolic studies. *Eur Respir J* 1990; 3: 465-468.
63. Clark JH, Greenleaf JE. Electronic bicycle ergometer: a simple calibration procedure. *J Appl Physiol* 1971; 30: 440-442.
64. Van Praagh E, Bedu M, Roddier P, Coudert J. A simple calibration method for mechanically braked cycle ergometers. *Int J Sports Med* 1992; 13: 27-30.
65. Russell JC, Dale JD. Dynamic torque calibration of bicycle ergometers. *J Appl Physiol* 1986; 61: 1217-1220.
66. Gardner RM, Schwartz R, Wong HC, Burke JP. Percutaneous indwelling radial-artery catheters for monitoring cardiovascular function. *N Engl J Med* 1974; 290: 1227-1231.
67. Clausen JL. Pulmonary function testing. Guidelines and controversies. Equipment, methods and normal values (1.^a ed.). Orlando: Grune & Stratton, Inc., 1984; 1-338.
68. Seldinger SI. Catheter replacement of the needle in percutaneous arteriography: a new technique. *Act Radiol* 1953; 39: 368-376.
69. Hansen JE, Feil MC. Blood gas quality control materials compared to tonometered blood in examining for interinstrument bias in PO₂. *Chest* 1988; 94: 49-54.
70. Scuderi PE, MacGregor DA, Bowton DL, Harris LC, Anderson R, James RL. Performance characteristics and interanalyzer variability of PO₂ measurements using tonometered human blood. *Am Rev Respir Dis* 1993; 147: 1354-1359.
71. Hansen JE, Stone ME, Ong ST, Van Kessel AL. Evaluation of blood gas quality control and proficiency testing materials by tonometry. *Am Rev Respir Dis* 1982; 125: 480-483.
72. Hansen JE, Clausen JL, Levy SE, Mohler JG, Van Kessel AL. Proficiency testing materials for pH and blood gases. The California Thoracic Society Experience. *Chest* 1986; 89: 214-217.
73. Agustí GN, A, Burgos F, Casan P, Perpiñá M, Rodríguez-Roisin R, Sánchez AL et al. Normativa de la gasometría arterial. *Arch Bronconeumol* 1998; 34: 142-153.
74. Douard H, Mora B, Broustet JP. Epreuves d'effort et tachycardies ventriculaires: l'expérience française. *Arch Mal Coeur* 1987; 80: 263-270.
75. Simel DL, Samsa GP, Matcha BD. Likelihood ratios with confidence: sample size estimation for diagnostic test studies. *J Clin Epidemiol* 1991; 44: 763-770.
76. Evidence-Based Medicine Working Group. Evidence-based medicine: a new approach to the teaching of medicine. *JAMA* 1992; 268: 2420-2425.
77. Zeballos RJ, Weisman IM. Behind the scenes of cardiopulmonary exercise testing. *Clin Chest Med* 1994; 15: 193-213.
78. Hansen JE, Sue DY, Wasserman K. Predicted values for clinical exercise testing. *Am Rev Respir Dis* 1984; 129: S49-S50.
79. 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: 700-708.
80. Jones NL, Summers E, Killian KJ. Influence of age and stature on exercise capacity during incremental cycle ergometry in men and women. *Am Rev Respir Dis* 1989; 140: 1373-1380.
81. Blackie SP, Fairbairn MS, McElvaney NG, Wilcox PG, Morrison NJ, Pardy RL. Normal values and ranges for ventilation and breathing pattern at maximal exercise. *Chest* 1991; 100: 136-142.
82. Blackie SP, Fairbairn MS, McElvaney NG, Morrison NJ, Wilcox PG, Pardy RL. Prediction of maximal oxygen uptake and power during cycle ergometry in subjects older than 55 years of age. *Am Rev Respir Dis* 1989; 139: 1424-1429.
83. Fairbairn MS, Blackie SP, McElvaney NG, Wiggs BR, Paré PD, Pardy RL. Prediction of heart rate and oxygen uptake during incremental and maximal exercise in healthy adults. *Chest* 1994; 105: 1365-1369.
84. 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: 1304-1313.
85. Bruce RA, Kusumi MS, Hosmer D. Maximal oxygen intake and nomographic assessment of functional aerobic impairment in cardiovascular disease. *Am Heart J* 1973; 85: 546-562.
86. Young DS. Implementation of SI Units for clinical laboratory data. Style specifications and conversion tables. *Ann Intern Med* 1987; 106: 114-129.
87. Cotes JE. SI units in respiratory medicine. *Am Rev Respir Med* 1995; 112: 753-755.
88. Ward SA, Whipp BJ. Influence of body CO₂ stores on ventilatory-metabolic coupling during exercise. En: Honda Y, Miyamoto K, Konno K, Widdicombe JG, editores. *Control of breathing and its modeling perspective*. Nueva York, Plenum Press 1992; 425-431.
89. Beaver WL, Wasserman K, Whipp BJ. A new method for detecting the anaerobic threshold by gas exchange. *J Appl Physiol* 1986; 60: 2020-2027.
90. West JB. Ventilation-perfusion inequality and overall gas exchange in computer model of the lung. *Respir Physiol* 1969; 7: 88-110.