PRUEBAS FUNCIONALES RESPIRATORIAS (II): TEST DE ESFUERZO CARDIOPULMONAR

B. Alcázar Navarrete, F. Martín-Vivaldi Martínez
Servicio de Neumología. H.U. Virgen de las Nieves. Granada

Pruebas Funcionales Respiratorias (II): Test de esfuerzo cardiopulmonar. Las pruebas de esfuerzo cardiopulmonar ofrecen una visión integrada de las respuestas al ejercicio de los sistemas cardiocirculatorio, respiratorio y musculoesquelético. El artículo hace una revisión de las indicaciones, metodología y análisis del test de esfuerzo cardiopulmonar.

INTRODUCCIÓN: De entre todas las situaciones que suponen un estrés físico para un organismo, el ejercicio extenuante es la más importante, debido a que precisa de la coordinación de diferentes sistemas del cuerpo para poder ser afrontada con éxito. Las pruebas de esfuerzo cardiopulmonar (PECP) permiten un análisis global de las respuestas globales al ejercicio físico en las que están implicados los sistemas respiratorio, cardiovascular, hematopoyético, neuropsicológico y músculo esquelético, que no están adecuadamente reflejadas mediante las mediciones de las funciones individuales de cada órgano. Hoy en día, las PECP son cada vez más utilizadas en un amplio espectro de aplicaciones clínicas para la evaluación de las causas de intolerancia al esfuerzo y los síntomas relacionados, así como para la determinación objetiva de la capacidad funcional y discapacidad. Es por ello por lo que los neumólogos deben conocer los fundamentos de las PECP, así como las indicaciones para su realización, dado que unos de los síntomas más frecuentes que presentan los pacientes con enfermedades del aparato respiratorio son la disnea y la intolerancia al esfuerzo, y que ésta tiene una débil correlación con el deterioro de la función respiratoria[1]. El propósito de este artículo es realizar un repaso a las indicaciones de la PECP, sus bases fisiológicas, tipos de PECP, material y procedimientos necesarios, y los diferentes patrones de respuesta al ejercicio.

Bases Fisiológicas de la PECP. El organismo humano tiene como fuente de energía principal para la realización de sus funciones la oxidación de hidratos de carbono, grasas y en menor medida, las proteínas, para poder obtener ATP, que es la molécula de intercambio energético del organismo. De este modo, por ejemplo, una molécula de glucosa dará lugar a 36 moléculas de ATP al entrar en la glicolisis aerobia (ciclo de Krebs). El ATP se unirá en la fibra muscular a la cabeza de la miosina, que la escindirá en ADP y fósforo inorgánico, liberándose en ese proceso energía que será la base de la contracción de la fibra de miosina en presencia de calcio. Durante el ejercicio físico se produce un aumento progresivo en el consumo de oxígeno por parte de las miocitos de los grupos musculares implicados, que se logra gracias a la puesta en marcha de diferentes mecanismos: 1. Mayor extracción del O_2 de la sangre periférica que irriga a los miocitos. 2. Vasodilatación selectiva de determinados vasos periféricos. 3. Incremento del gasto cardíaco, expresado como volumen sistólico por frecuencia cardiaca. 4. Vasodilatación de los capilares pulmonares, con aumento del flujo y de la captación cuantitativa del O_2. 5. Aumento de la ventilación alveolar, expresada como volumen corriente por frecuencia respiratoria.

Estos mecanismos son suficientes para mantener un ejercicio de intensidad moderada, sin embargo, conforme el ejercicio es más extenuante, la demanda de oxígeno supera a la oferta, y por tanto las células musculares comienzan a utilizar las vías de la glucolisis anaerobia (Glucosa→2 Piruvato +2 ATP→ 2 lactato), con aumento de la producción de ácido láctico y CO_2, el consumo de las reservas de glucosa y ácidos grados y el desarrollo de acidosis metabólica progresiva, hasta un punto tal en el que los mecanismos arriba indicados son incapaces de mantener las necesidades de demanda de O_2 y de eliminación de los productos de desecho celular, llevando a la percepción de sensación de fatiga muscular, dolor muscular y/o disnea[2].

Respuesta al ejercicio en sujetos normales. a. *Gasto cardíaco (GC):* en los individuos sanos, el GC aumento de forma proporcional a la intensidad del ejercicio hasta el 60% del consumo de oxígeno máximo (VO_2max); a partir de aquí, asciende de manera más lenta hasta formar una meseta. El GC depende del volumen sistólico (Vs) y de la frecuencia cardiaca (Fc). El primero aumenta en la primera fase del ejercicio, y a partir de ese momento los cambios en el GC dependen fundamentalmente de los aumentos de la FC. b. *Ventilación- minuto (V_E):* la ventilación minuto depende del Volumen tidal (Vt) y de la frecuencia respiratoria (Fr). Durante el ejercicio, en las primeras fases el aumento de la V_E se produce a expensas del aumento del Vt, y en fases finales depende fundamentalmente de cambios en la Fr.

INDICACIONES DE LA PRUEBA DE ESFUERZO CARDIOPULMONAR. Para la realización de la PECP es necesario conocer previamente el problema clínico del paciente que motiva su realización, así como los objetivos específicos que se pretenden conseguir; por tanto es indispensable disponer de la historia clínica, exploración física, radiografía de tórax, función pulmonar y ECG del paciente, con vistas a decidir el tipo de protocolo más adecuado y las variables necesarias para la interpretación de la PECP[3]. Las indicaciones generales para la realización de una PECP son[4]: 1. Evaluación de la tolerancia al ejercicio. 2. Evaluación de la intolerancia al ejercicio sin causa aclarada. 3. Evaluación de pacientes con enfermedades cardiovasculares. 4. Evaluación de pacientes con enfermedades o síntomas respiratorios. 5. Evaluación preoperatoria. 6. Evaluación del ejercicio y prescripción de rehabilitación respiratoria. 7. Evaluación de la disfunción- discapacidad- incapacidad. 8. Evaluación para transplante pulmonar, cardíaco o cardiopulmonar.

Material, personal, protocolos y mediciones durante la PECP. *Material necesario:* 1. Ergómetro: los comúnmente empleados son el tapiz rodante y el cicloergómetro. La decisión de cuál utilizar depende de los objetivos del test y del grado de debilidad del paciente. Actualmente el cicloergómetro es más utilizado debido a que permite cuantificar de forma segura el grado de trabajo externo que desarrolla el paciente[5]. 2. Dispositivos de medición de O_2 y de CO_2: habitualmente se utilizan para el CO_2 analizadores que se basan en la absorción de infrarrojos por el CO_2. Para la medición del O2, se utilizan analizadores basados en reacciones electroquímicas (célula de zirconio) o magnéticas (analizadores paramagnéticos) de las moléculas de oxígeno. Estos analizadores tienen el inconveniente de que son muy sensibles al vapor de agua, por lo que se utiliza un tubo de muestreo fabricado con el polímero nafión, que absorben el vapor de agua. 3. Métodos de medición del intercambio de gases (VO_2 y VCO_2): el más habitual es el análisis respiración a respiración[6]. 4. Dispositivos de medición de flujo/volumen del aire respirado (neumotacógrafos, medidor de flujo Pitot, medidor de flujo de masa, turbina).

5. Electrocardiograma (ECG) de 12 derivaciones. 6. Pulsioxímetro. 7. Medición de la presión arterial: invasiva o no invasiva. *Personal necesario:* Las PECP precisan de personal entrenado de forma adecuada en su realización y con conocimientos básicos sobre la fisiología del ejercicio. Deben estar supervisadas por un médico, siendo el grado de supervisión necesario dependiente del estado clínico del paciente. Todo el personal que intervenga en la realización de una PECP debe

tener conocimientos básicos sobre procedimientos de reanimación cardiopulmonar. *Protocolos de PECP:* 1. Protocolos incrementales: permiten evaluar tanto la respuesta biológica al ejercicio submáximo como la del ejercicio pico en un corto período de tiempo (20 minutos). Suelen constar de una fase de reposo, seguido de un periodo de ejercicio sin carga, para ir incrementando de forma progresiva la carga de trabajo hasta llegar al límite de tolerancia, y finalmente una fase de recuperación. Los diferentes incrementos en la carga de trabajo no afectan a los parámetros medidos en la PECP, aunque pueden resultar en cambios en la máxima carga de trabajo[7]. En tapiz rodante el más utilizado es el protocolo de Bruce. 2. Protocolos a carga constante: consisten en un esfuerzo físico de intensidad moderada, inferior al umbral láctico, de forma tal que permite prolongar la duración del esfuerzo. Estos tests permiten evaluar si el paciente es capaz de aguantar un determinado nivel de ejercicio durante un periodo prolongado, evaluar las necesidades de oxígeno durante el ejercicio, y sobre todo monitorizar las respuestas a las intervenciones médicas (rehabilitación, cirugía...)[8]. *Mediciones durante la PECP:* 1. Carga de trabajo externo: medida en watios (W). 2. Intercambio de gases a nivel metabólico: a. VO_2: consumo de oxígeno. b. VCO_2: producción de CO_2 por tejidos. c. RER: cociente de intercambio respiratorio (VCO_2/VO_2). d. Umbral anaerobio (UA): medición invasiva (lactato) o no invasias (V slope...). 3. Sistema cardiovascular: a. FC: frecuencia cardiaca. b. TA: tensión arterial. c. Pulso de O_2: (VO_2/FC). 4. Función ventilatoria: a.–V_E : ventilación minuto (volumen de gas espirado por minuto). b. V_T : volumen corriente. c. FR: frecuencia respiratoria. **5.** Intercambio de gases pulmonar: a. $SatO_2$: saturación arterial de O_2. b. V_E/VCO_2: equivalente respiratorio de CO_2. c. V_E/VO_2: equivalente respiratorio de O_2. d. $P_{ET}O_2$: presión de O_2 en el aire respirado al final de una exhalación. e. $P_{ET}CO_2$: presión de O_2 en el aire respirado al final de una exhalación. f. $P(A\text{-}a)O_2$: diferencia alveoloarterial de oxígeno. g. Vd/Vt: espacio muerto del volumen corriente ($[PaCO_2 - P_{ET}CO_2]/PaCO_2$) *100. **6.** Síntomas (disnea, dolor torácico, fatiga).

Interpretación de la PECP. Dado que la limitación al ejercicio normalmente tiene un origen multifactorial, la aproximación a la interpretación de una PECP no debe basarse en una única medición, sino en el análisis integrado de conjuntos de variables estudiadas. Aunque los algoritmos pueden resultar de utilidad en el diagnóstico diferencial, son poco adecuados en la evaluación de enfermedades leves así como en las enfermedades combinadas[9, 10]. Los datos deben ser presentados de forma numérica pero también en forma gráfica. *Valoración del esfuerzo máximo en la PECP*[11]: –El paciente alcanza el VO_2 pico predicho y/o llega al plateau. –Alcanza la máxima carga de trabajo. –Alcanza la máxima FR predicha. –Hay evidencia de limitación ventilatoria (VE pico llega a MVV). –RER mayor de 1,15. –Disnea en la escala de Borg 9-10/10. *Interpretación de la PECP:* 1. ¿Es la capacidad aeróbica normal? Una relación VO_2max/VO_2 pico normal descarta la existencia de incapacidad funcional significativa. 2. ¿Es la tasa metabólica apropiada durante el esfuerzo? La relación VO_2/W puede demostrar altos VO_2 para una carga de trabajo dada, demostrando necesidades metabólicas excesivas durante el ejercicio (obesidad, hipertiroidismo...). 3. ¿Contribuye la función cardiovascular a la intolerancia al ejercicio? Cuando la FC pico llega a la FC estimada máxima la función cardiovascular ha contribuido a la limitación al ejercicio. Para averiguar si la causa subyacente es cardiovascular (insuficiencia cardiaca, enfermedad vascular periférica o vascular pulmonar) o bien secundaria a decondicionamiento puede ser útil el análisis de otros datos como el UA, V_E/VCO_2, Vd/Vt y pulso de oxígeno. 4. ¿Contribuye la función ventilatoria a la limitación al ejercicio? La relación V_E/ MVV y la reserva ventilatoria (MVV- V_E/ MVV) suelen indicar la presencia de un problema de ventilación pulmonar como causante de la intolerancia al ejercicio de forma típica, y ayuda a descartar un problema cardiológico normalmente. 5. ¿Contribuye el intercambio de gases pulmonar a la limitación al esfuerzo? La desaturación con el esfuerzo es un hallazgo frecuente en pacientes con enfermedad pulmonar intersticial, enfermedad vascular pulmonar y EPOC. La ineficiencia de la ventilación (reflejada por un cociente V_E/VCO_2 alterado) puede ser debida a hiperventilación (ansiedad, síndrome de hiperventilación) o desequilibrios en la relación V/Q (enfermedad cardíaca, enfermedad respiratoria o miopatías mitocondriales). Esto puede ser discriminado con el uso del Vd/Vt, que aumentará en el segundo caso. 6. ¿Hay acidosis metabólica prematura? Un UA bajo puede ser de ayuda en el diagnóstico de los patrones de respuesta al ejercicio, aunque tiene un valor limitado como variable discriminativa. *Patrones de respuesta al ejercicio en la PECP:* Aparecen en la Tabla 1.

Tabla 1: Patrones de respuesta cardiopulmonar habituales durante el ejercicio (modificado de referencia 4)

	ICC	EPOC	EPID	EVP	Obesidad	Decondicionamiento
VO_2 max	↓	↓	↓	↓	=	↓
UA	↓	↓/=	↓/=	↓	=	↓
FC pico	↓/↑/=	↓	↓	=/↓	=/↓	=/↓
Pulso de O_2	↓	=/↓	=/↓	↓	=	↓
V_E/MVV	=	↑	↑	=	=	=
V_E/VCO_2 al UA	↑	↑	↑	↑	=	=
Vd/Vt	↑	↑	↑	↑	=	=
PaO_2	=	↓/↑/=	↓	↓	=	=
$P(A-a)O_2$	=	↑	↑	↑	↓	=

Abreviaturas: ICC: insuficiencia cardiaca; EPID: enfermedad pulmonar intersticial difusa; EVP: enfermedad vascular pulmonar. EPOC: enfermedad pulmonar obstructiva crónica.

BIBLIOGRAFÍA

1. Wasserman K, Sue DY, Casaburi R, Moricca RB. Selection criteria or exercise training in pulmonary rehabilitation. *Eur Respir J* 1989; 7 Suppl 604- 610.
2. Guyton A, Hall J. Sports physiology. In: *Guyton A, Hall J. Textbook of Medical Physiology*. Edition 10ª. Philadelphia, WB Saunders; 2000. p 968-977.
3. Roca J, Burgos F, et al. Grupo de Trabajo de la SEPAR. Pruebas de ejercicio cardiopulmonar. *Arch Bronconeumol* 2001; 37: 247- 268.
4. ATS/ACCP Statement on cardiopulmonary exercise testing. Am J Respir Crit Care Med 2003; 167: 211- 277.
5. Committee on Exercise Testing. ACC/AHA Guidelines for Exercise Testing: a report of the American College of Cardiology/Ame-

rican Heart Association Task Force on Practice Guidelines. *J Am Coll Cardiol* 1997; 30:260–311.
6. Beaver WL, Wasserman K, Whipp BJ. On-line computer analysis and breath-by-breath graphical display of exercise function tests. *J Appl Physiol* 1973; 34:128–134.
7. Debigare R, Maltais F, Mallet M, Casaburi R, Leblanc P. Influence of work rate incremental rate on the exercise responses in patients with COPD. Med Sci Sports Exerc 2000; 32: 1365- 1368.
8. Oga T, Nishimura K, Tsukino M, Hajiro T, Ikeda A, Izumi T. The effects of oxitropium bromide on exercise performance in patients with stable chronic obstructive pulmonary disease. A comparison of three different exercise tests. *Am J Respir Crit Care Med* 2000;161: 1897–1901.
9. Wasserman K, Hansen JE, Sue DY, Whipp BJ, Casaburi R. Principles of exercise testing and interpretation: including pathophysiology and clinical applications. 3rd ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins; 1999.
10. Eschenbacher WL, Mannina A. An algorithm for the interpretation cardiopulmonary exercise tests. *Chest* 1990; 97:263–267.
11. Shepard RJ. Tests of maximum oxygen intake: a critical review. *Sports Med* 1984; 1:99–124.

MEDICINA NUCLEAR (I) GAMMAGRAFÍA DE VENTILACIÓN / PERFUSIÓN PULMONAR

V. Almadana Pacheco, J. M. Sánchez Varilla
Servicio de Neumología. Hospital Virgen Macarena. Sevilla.

Título abreviado: La aplicación de la gammagrafía de ventilación/perfusión ofrece la posibilidad de diagnosticar tromboembolismo pulmonar, estudiar alteraciones de permeabilidad de la membrana alveolo-capilar de forma regional y detectar precozmente focos de inflamación, ampliando posibilidades para el empleo de esta técnica en neumología más allá del diagnóstico del tromboembolismo pulmonar.

1. Generalidades: La gammagrafía de ventilación/perfusión pulmonar es una técnica mediante la que se consigue información aproximada sobre la distribución de la ventilación y vascularización pulmonar mediante la detección de marcadores (radiofármacos) que se administran al paciente. El fármaco de elección dependerá del estudio que se vaya a practicar.

Si se trata de estudios de perfusión, es frecuente el empleo de micelas de agregados de albúmina humana o M.A.A. (macroagregados de albúmina) marcados con ^{99m}Tc. Las micelas suelen tener un tamaño medio de 10 a 100 micras, similar al de las arteriolas pulmonares más finas y superior al de los capilares venosos y postalveolares. Tras la administración de una inyección intravenosa del fármaco, este llega al ventrículo derecho, a las venas pulmonares y tras esto, a la red arterial pulmonar. Se van a obtener áreas fotopénicas que se corresponden con regiones hipoperfundidas, en relación a embolias o alteraciones del parénquima. Por tanto, es una técnica muy sensible para la detección de zonas mal prefundidas pero no es específica. Las micelas se eliminan en un periodo de cuatro a ocho horas por fragmentación y fagocitosis[1].

Otra posibilidad es el uso de microesferas de albúmina humana que son partículas de unas 10 a 45 micras con una vida de media de unas 7 horas[2].

Para los estudios de ventilación se aplican aerosoles a base de ácido dietilentriamina-penta-acético o DTPA-^{99m}Tc o por pseudogas de grafito-^{99m}Tc[1,2]. Se trata de partículas de dos a cinco micras que son inhaladas por el paciente. Tienden a depositarse en tráquea y faringe posterior, pero al final van a impactar en los bronquios terminales[2]. Se obtienen áreas de menor actividad que se corresponden con zonas de hipoventilación o de no ventilación. Pueden existir zonas de actividad en esófago o estómago que se corresponden con partículas deglutidas[2]. Fármacos alternativos son los gases radiactivos, siendo los más usados son ^{133}Xe, ^{127}Xe y ^{88m}Kr[2].

Técnica 1.- Gammagrafía de perfusión: se precisa una preparación especial del paciente. Sólo se debe suspender la lactancia en caso de puérperas durante 24 horas tras la exploración. No existen contraindicaciones formales exceptuando las grandes comunicaciones arteriovenosas y salvando a gestantes y periodo de lactancia. Son contraindicaciones relativas la existencia de comunicaciones arteriovenosas de pequeño débito y la hipertensión pulmonar grave, en cuyo caso se reduce el tamaño de las micelas que se inyectan. La dosis es de 1,8-3 MegaBecquerel/kilogramo de peso corporal. La estabilidad de la emulsión preparada es de unas seis horas. Justo tras la administración del radiofármaco se procede a la exploración, colocando al paciente en decúbito supino, posición en la que el flujo sanguíneo tiene una distribución más homogénea del ápex a la base[2]. Se efectúan proyecciones anteriores, posteriores y oblicuas posteriores. 2. Gammagrafía de ventilación: al igual que en el caso anterior, no es necesaria una preparación especial del paciente. Inmediatamente tras la administración de DTPA liofilizado se comienza la exploración con el paciente colocado en decúbito supino.

Por protocolo se prefiere iniciar primero la gammagrafía de ventilación ya que implica menores dosis de radioactividad para los pulmones.

Interpretación: Para la interpretación general de la técnica se tiene en cuenta que en las proyecciones posteroanteriores se ven poco los ángulos costofrénicos. Además en las proyecciones anterolaterales existe una hipocaptación en región medial por la interposición del corazón y una hipoactividad en bases en mujeres por la interposición de las mamas. También puede verse una hipoperfusión central, circular o estelar, que se corresponde con los hilios pulmonares[2]. Las imágenes normales se pueden ver alteradas por la presencia de alteraciones como cardiomegalia, cifoescoliosis, pectus excavatum, eventración diafragmática, dilatación del ventrículo izquierdo o una aorta tortuosa[2].

2. Tromboembolismo pulmonar: Insistiendo en la gran importancia de la clínica como apoyo para el diagnóstico del tromboembolismo pulmonar, la base para la interpretación de la exploración en la enfermedad tromboembólica es la detección de alteraciones topográficas con defectos en uno o más segmentos pulmonares en la gammagrafía perfusión de forma coincidente con una gammagrafía de ventilación normal, hallazgos estos que son específicos de tromboembolismo pulmonar[1].

Además, apoyará el diagnóstico la existencia de una radiografía de tórax normal con un estudio ecocardiográfico que evidencie un aumento del ventrículo derecho con signos de hipertensión pulmonar.

Ante la gran variedad de defectos que pueden enmascarar una embolia se han establecido una serie de criterios en función de las probabilidades para tromboembolismo pulmonar, siendo una de las clasificaciones más conocidas la que surgió a partir del estudio PIOPED. Tabla I.[3,4,5,6,7].

Según esta clasificación, el estudio gammagráfico determina diferentes probabilidades de diagnóstico para tromboembolismo pulmonar. Así, un estudio de alta probabilidad es aquel que presenta una probabilidad de un 80% o más de confirmación del diagnóstico para enfermedad tromboembólica. Uno de