

Test cardiopulmonar: una herramienta de utilidad diagnóstica y pronóstica

MÓNICA ZAGOLIN^{1,2}, LUZ MARÍA TRUJILLO^{3,4,a},
SERGIO VILLANUEVA^{5,b,c}, MAURICIO RUIZ^{2,6},
ASTRID VON OETINGER^{7,8,a}

Cardiopulmonary exercise test for diagnostic and prognostic purposes

The functional assessment of patients with dyspnea usually uses static or submaximal exercise tests, which provide limited information because they do not expose patients to the real situation that causes exercise intolerance. The cardiopulmonary exercise test (CPET) is an increasingly used tool that can be used in these circumstances. It determines peak oxygen consumption, anaerobic threshold and cardiac and respiratory reserves, measuring oxygen uptake and carbon dioxide production during standardized exercise conditions. It is useful for risk assessment in cardiothoracic surgery and can provide valuable information such as the timing for transplant in patients with severe chronic disease. The test is non-invasive, has a short duration, and exhibits an adequate safety profile in specialized centers. It is mainly indicated for the dynamic evaluation of athletes or patients with heart, respiratory, and neuromuscular diseases, it is essential part of the study of dyspnea of unknown origin, and in the prognostic assessment of patients who face highly complex interventions. This review provides a comprehensive review of CPET with emphasis on its main indications in healthy people, athletes and, in particular, in functional evaluation of patients with exercise limitations in the context of their chronic diseases.

(Rev Med Chile 2020; 148: 506-517)

Key words: Exercise Test; Oxygen consumption; Physical Functional Performance.

¹Unidad Docente, Universidad de Chile, Instituto Nacional del Tórax. Santiago, Chile.

²Departamento de Enfermedades Respiratorias, Clínica Santa María. Santiago, Chile.

³Escuela de Kinesiología, Facultad de Ciencias de la Salud, Universidad de Las Américas. Santiago, Chile.

⁴Escuela de Kinesiología, Facultad de Odontología y Salud, Universidad Diego Portales. Santiago, Chile.

⁵Programa de Fisiología y Biofísica, Instituto de Ciencias Biomédicas, Facultad de Medicina, Universidad de Chile, Santiago, Chile.

⁶Departamento de Enfermedades Respiratorias, Hospital Clínico Universidad de Chile, Santiago, Chile.

⁷Escuela de Kinesiología, Facultad de Ciencias de la Salud, Universidad San Sebastián. Santiago, Chile.

⁸Dirección de Postgrado, Facultad de Ciencias, Universidad Mayor. Santiago, Chile.

^aKinesióloga.

^bBioquímico.

^cDoctor en Ciencias (PhD).

Los autores declaran no tener conflictos de interés. Este trabajo no obtuvo financiamiento.

Recibido el 2 de junio de 2019, Aceptado el 2 de enero de 2020.

Correspondencia a:
Astrid von Oetinger

Escuela de Kinesiología, Facultad de Ciencias de la Salud, Universidad San Sebastián, Lota 2464, Providencia. Santiago, Chile.
astridvon@gmail.com

La disnea es el síntoma principal de muchas enfermedades cardíacas, pulmonares y neuromusculares, que se manifiestan con intolerancia al ejercicio. Dentro de la evaluación del paciente con disnea se dispone de exámenes funcionales tales como espirometría, test de difusión con monóxido de carbono, electrocardiograma (ECG) y ecocardiografía, entre otras. Sin embargo, todas son evaluaciones en reposo que no dan cuenta certeramente de la intolerancia al esfuerzo¹. Otras pruebas que sí son de esfuerzo,

tales como el test de caminata de 6 min (TC6m), el test de escalera, el test incremental de la lanzadera (“shuttle test”) son evaluaciones submáximas o máximas, pero que no logran precisar el origen de la disnea, ni dan información completa sobre el estado funcional de los diferentes sistemas relacionados con este síntoma².

Por su parte, los bajos niveles de aptitud cardiorrespiratoria (ACR) están asociados a un alto riesgo de enfermedad cardiovascular y mortalidad por todas las causas³. La Asociación Americana

para el corazón (AHA) cataloga a la ACR como un signo clínico vital, ya que es un predictor de mortalidad aún más relevante que los factores de riesgo establecidos (tabaquismo, hipertensión, dislipidemia y diabetes mellitus tipo 2). De acuerdo con ello, la AHA sugiere que la evaluación de la ACR debe ser masificada³, siendo la prueba de ejercicio máximo o test cardiopulmonar (CPET) el método estándar para ello^{3,5}.

El CPET o ergoespirometría es un examen que permite evaluar de manera integrada, dinámica y precisa la función cardíaca, respiratoria, metabólica y neuromuscular mediante el análisis de gases espirados durante un esfuerzo máximo estandarizado⁶. Esta evaluación permite la medición del consumo máximo de oxígeno (VO_2 *peak* o VO_2 *máx*), entre otras múltiples variables fisiológicas y parámetros ergoespirométricos⁷.

Históricamente, el CPET fue desarrollado para la evaluación de la capacidad física de deportistas, principalmente aquellos involucrados en disciplinas aeróbicas. En estos casos el VO_2 *máx* no solo predice el rendimiento físico, sino que permite planificar los entrenamientos de acuerdo con la evolución de dicho parámetro, optimizando el desempeño deportivo⁸.

En la actualidad el CPET se ha posicionado como una herramienta determinante en el ámbito clínico, permitiendo la valoración de pacientes con diversas patologías, fundamentalmente del ámbito cardiopulmonar³. Se utiliza tanto en la evaluación inicial como posterior a un programa de rehabilitación, o también previo a una intervención quirúrgica a modo de predictor de riesgo⁶. Adicionalmente, ha sido utilizado en la valoración del resultado de terapias y en la categorización de riesgo para trasplantes cardíaco o pulmonar e instalación de dispositivos de asistencia⁵⁻⁸.

Al permitir una evaluación dinámica, el CPET reproduce más fielmente los problemas que se presentan en sujetos que tienen algún grado de intolerancia a las actividades de la vida diaria o que presentan disnea con el ejercicio^{9,10}.

Recientemente, la AHA recomendó la realización anual de un CPET como práctica clínica de rutina -similar a los exámenes de salud preventiva- considerándolo como la mejor opción en las enfermedades crónicas³. En Chile, a pesar de la mayor difusión y disponibilidad del CPET, sigue siendo una herramienta subutilizada; fundamentalmente por el desconocimiento de sus

indicaciones y perfil de seguridad, así como por su elevado costo e insuficiente cobertura por los sistemas aseguradores¹¹. Es por ello que el objetivo de este artículo es presentar una visión actualizada del CPET como herramienta clínica y destacar la importancia de esta prueba en la evaluación de la ACR.

Principios del test cardiopulmonar

El CPET es un examen no invasivo, ambulatorio y breve (< 20 min)⁴. Durante la prueba, el sujeto se somete a un esfuerzo incremental de carácter máximo^{1,2}, permitiendo evaluar paralelamente parámetros oxihemodinámicos como frecuencia cardíaca (fc), electrocardiograma de 12 derivaciones, presión arterial (PA), oximetría de pulso para medición de saturación ($SatO_2$) y gases espirados, a través de mascarilla hermética³ (Tabla 1, Figura 1).

La integración de todas las variables permite al sistema otorgar información sobre el consumo de oxígeno obtenido (VO_2 *máx* o VO_2 *peak*), equivalente ventilatorio de CO_2 (VE/VCO_2), umbral anaeróbico (UA), reserva cardiorrespiratoria, pulso de oxígeno, cociente respiratorio (RER) y carga máxima, entre otras^{3,11-13}.

El sujeto puede realizar la prueba en cinta rodante (trotadora) o bicicleta ergométrica, dependiendo del perfil del paciente y de los objetivos del estudio. Las ventajas de utilizar cinta rodante son que moviliza mayor masa muscular, es una actividad conocida y permite obtener valores de VO_2 *máx* hasta 6-12% superiores al del cicloergómetro¹⁵, siendo más utilizada en deportistas y personas sanas. El cicloergómetro, en tanto, se utiliza preferentemente en evaluación de pacientes, adultos mayores y niños sanos, por razones de seguridad, ya que podrían experimentar inestabilidad o mareo en la trotadora, afectando su rendimiento. Además, este último permite estimar la carga de manera más simple y la monitorización de los parámetros se ve menos afectada por los movimientos de las extremidades^{3,12}.

Desarrollo del CPET

El CPET es un procedimiento seguro (mortalidad: 1 en 10.000) cuando se cumplen las

Tabla 1. Variables medidas durante la ejecución del CPET

	Generales	Sintomatología, Test de Borg+, frecuencia cardíaca (Fc), frecuencia respiratoria, presión arterial, ECG, oximetría de pulso
Variables fisiológicas	Ventilatorias	<ul style="list-style-type: none"> - Reserva ventilatoria - Ventilación por minuto (VE) - Volumen corriente (VT) - Capacidad inspiratoria - Tiempo inspiratorio/espírorio
	Cardiovasculares	<ul style="list-style-type: none"> - Reserva cardíaca - Pulso de oxígeno (VO_2/Fc) - Relación Fc/VO_2
	Específicas del test	<ul style="list-style-type: none"> - $VO_{2\text{máx/peak}}$ - Tasa de producción de CO_2 (VCO_2) - Carga máxima (en watts) - Cociente respiratorio VCO_2/VO_2 - Umbral anaeróbico (UA) - Valor absoluto y pendiente VE/VCO_2 o equivalente ventilatorio de CO_2 - Presión de oxígeno y de CO_2 al final de la espiración (PETO₂ y PET CO_2) - Relación VO_2/carga
Variables ergo-espirométricas	Ventilatorias	<ul style="list-style-type: none"> - Ventilación voluntaria máxima (VVM) - Capacidad vital forzada (CVF) - Volumen espirado del primer segundo (VEF₁) - Relación VEF_1/CVF - Espacio muerto

Adaptado de referencias 11-15.



Figura 1. Test cardiopulmonar. Voluntaria sana efectuando el CPET. La mascarilla hermética y los sensores incorporados permiten la determinación y registro en tiempo real de los gases espirados, los que son analizados -en conjunto con otros parámetros fisiológicos- por un software especializado.

condiciones de ambiente, dotación, monitorización y evaluación sugeridas por las normativas internacionales¹⁵. Antes de efectuar la prueba es fundamental evaluar las indicaciones y contraindicaciones del examen, las que se detallan en la Tabla 2.

La prueba consta de una primera etapa de "ajustes", en donde se evalúan parámetros en reposo (1-2 min), seguida de una fase de calentamiento (1-3 min, sin carga o carga muy baja), para familiarizar al paciente con el ejercicio. Luego continuar con cargas incrementales según lo programado y finalizar con una fase de recupe-

ración (carga mínima por 1-3 min)¹⁶. En general, la carga por intervalos fluctúa entre 5 y 35 watts, dependiendo de la patología y condición física, y ésta se incrementa cada minuto hasta el máximo tolerado^{15,17}. La prueba idealmente es máxima y puede ser detenida por síntomas que se consideren de riesgo (Tabla 3) o cuando el paciente ya no es capaz de alcanzar las revoluciones requeridas, generalmente entre 55-65 por minuto¹⁶.

Los protocolos de ejercicio más utilizados son el incremental y el de carga constante. El incremental consiste en aumentar progresivamente la carga hasta llegar al límite de tolerancia del

Tabla 2. Contraindicaciones absolutas y relativas para el CPET

	Contraindicaciones absolutas	Contraindicaciones relativas
Cardíaca	Infarto reciente (3-5 días), angina inestable, arritmias no controladas, estenosis aórtica sintomática, falla cardíaca sintomática, endocarditis, pericarditis, miocarditis, disección aórtica, bloqueo aurículo-ventricular severo	Cardiomiopatía hipertrófica, taqui o bradi-arritmia, hipertensión arterial grave Presión sistólica > 200 mmHg Presión diastólica > 120 mmHg), enfermedad valvular moderada, enfermedad coronaria
Vascular	Embolia pulmonar o infarto	Hipertensión pulmonar severa
Respiratoria	Asma no controlada, insuficiencia respiratoria aguda, saturación de oxígeno < 85%	
Generales	Síncope reciente, limitación ortopédica, trombosis, infección sistémica, epilepsia, insuficiencia hepática, incapacidad para colaborar	Desequilibrio hidroelectrolítico (K ⁺ , Mg ⁺⁺), embarazo, enfermedad metabólica no controlada (diabetes, insuficiencia renal), síndrome inmunodeficiencia adquirida no tratada

Adaptado de referencia 15.

Tabla 3. Criterios de finalización del CPET por el operador: absolutos y relativos

Criterios absolutos	Criterios relativos
El deseo reiterado o aviso del paciente	Fatiga, cansancio, disnea y claudicación
Dolor torácico, cianosis, palidez, elevación del segmento ST en ECG	Taquicardia no severa incluyendo las paroxísticas supra-ventriculares
Descenso de presión sistólica > 20 mmHg desde el valor más alto previo	Bloqueo de rama que simule taquicardia ventricular
Hipertensión arterial > 250/120 mmHg	
Arritmias complejas (bloqueo aurículo-ventricular de 2°-3°, extrasístole ventricular frecuente, taquicardia ventricular, flutter o fibrilación ventricular)	
Desaturación < 80%, síntomas o signos de insuficiencia respiratoria aguda	
Síntomas neurológicos (ataxia, mareo o síncope)	

Adaptado de referencias 15 y 16.

sujeto¹³, mientras que el de carga constante evalúa el tiempo a la fatiga, utilizando 50-70% de la carga máxima obtenida en un CPET incremental previo¹⁶.

Parámetros de utilidad que entrega el CPET

Algunos de los principales indicadores que se obtienen del CPET son (Tabla 1).

Consumo máximo de O₂ (VO₂máx: maximal oxygen uptake)

Cantidad de oxígeno que el organismo utiliza por unidad de tiempo y refleja el nivel metabólico del individuo. En reposo el VO₂ es alrededor de 0,25 L/min para una persona sana joven y de tamaño promedio. El VO₂máx da cuenta de la tolerancia al esfuerzo, se relaciona con la intensidad del ejercicio y se mide en deportistas que logran llegar a una meseta del consumo¹¹. VO₂ peak: En pacientes lograr un VO₂ máximo no siempre es factible, denominándose VO₂ peak (*oxygen uptake at peak exercise*) al VO₂ más alto logrado. El VO₂ peak se expresa en L/min, ml/kg/min de peso real o como porcentaje del valor predicho (considerando género, edad, raza y talla). El valor en

ml/min/kg corresponde al valor más preciso para comparar con estándares normales, entre pacientes, o del individuo consigo mismo en diferentes momentos¹². Los principios de la determinación de VO₂máx y VO₂ peak se muestran en la Figura 2.

Umbral láctico o anaeróbico (UA)

Es el valor de VO₂ en que se produce un incremento en la concentración de ácido láctico plasmático debido al aporte del metabolismo anaeróbico (glucólisis)⁴. Es un indicador objetivo y reproducible de la capacidad funcional, independiente de la motivación del sujeto. La imposibilidad de la mayoría de los pacientes de lograr el VO₂máx determina la valoración de parámetros submáximos, como el UA, para la evaluación funcional^{11,12}.

La determinación del UA es útil como indicador para determinar el nivel de aptitud física, la prescripción de ejercicio o para controlar el efecto del entrenamiento físico. El UA delimita el límite superior respecto al rango de intensidades a las que se puede trabajar con predominio aeróbico, mientras que cargas sobre el UA implican un aumento progresivo en la intensidad de trabajo asociado con una disminución progresiva en la tolerancia al ejercicio^{13,14}.

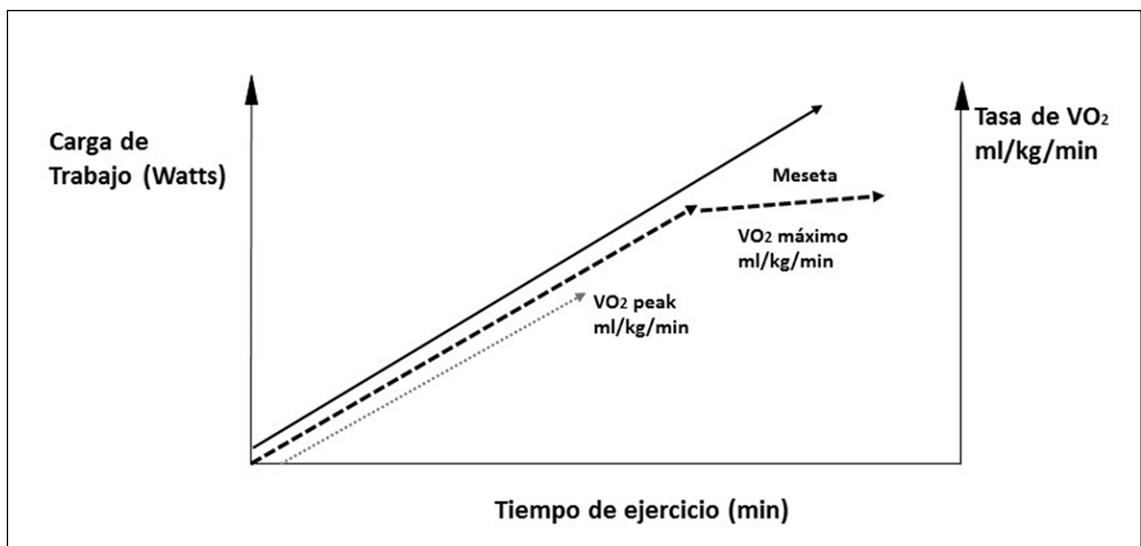


Figura 2. Carga de trabajo y tasa de consumo de oxígeno en el tiempo. La línea continua ilustra la carga de trabajo y las líneas discontinuas muestran la tasa de consumo de oxígeno. La meseta representa el consumo de oxígeno máximo (VO₂max) en la línea discontinua gruesa. En individuos que no alcanzan la meseta (línea discontinua delgada) se obtiene el VO₂peak. Adaptado de referencia 15.

RER (Cociente Respiratorio: VCO_2/VO_2)

Es la relación entre el volumen de dióxido de carbono producido y el volumen de oxígeno consumido en los tejidos corporales (VCO_2/VO_2). El RER es un indicador consistente, tanto en sujetos sanos como enfermos y se utiliza para identificar el principal tipo de sustrato energético que se metaboliza durante la respiración celular. Valores RER cercanos a 0,7 se interpretan como oxidación predominante de lípidos y cercanos a 1,0 indican oxidación predominante de carbohidratos, siendo un valor igual o superior a 1,1 indicador de esfuerzo máximo durante el CPET^{11,12}.

Equivalente ventilatorio de CO_2

Es la relación entre la ventilación por minuto (VE) y la eliminación de CO_2 (VE/VCO_2). En su magnitud inciden el espacio muerto, nivel de perfusión pulmonar y las alteraciones en el patrón ventilatorio. Mientras más elevado es su valor, indica que se requiere mayor número de ventilaciones para eliminar el CO_2 , traduciendo aumento del espacio muerto por hipoperfusión pulmonar o un trastorno ventilatorio^{13,14}.

Relación VO_2 /carga de trabajo (VO_2/WR)

Este parámetro representa la eficiencia de conversión de energía metabólica a química para realizar el trabajo mecánico (eficiencia mecánica del sistema musculoesquelético). Una reducción

en el valor de esta relación VO_2/WR indica deficiencias en el transporte de O_2 , como puede ocurrir con enfermedades del cardíacas, pulmonares o circulatorias, por lo que se recomienda evaluación sistemática de esta pendiente^{11,15}.

Recomendaciones de uso de CPET

Las principales condiciones en las que la utilidad del CPET se encuentra bien fundamentada¹²⁻¹⁷, se resume a continuación, detallándose en la Tabla 4.

Evaluación en deportistas

Es de gran utilidad para seguimiento de deportistas de alto rendimiento y para los que deseen evaluar de manera objetiva y directa su capacidad aeróbica y nivel de entrenamiento¹⁸.

Enfermedad cardíaca-respiratoria crónica

Tanto en evaluación inicial de pacientes como en su seguimiento; en evaluación de nuevas terapias; en la rehabilitación; y en la indicación de trasplante^{16,19}.

Enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC)

En pacientes sometidos a cirugía resectiva se ha evidenciado una correlación significativa del

Tabla 4. Principales indicaciones del CPET para sujetos sanos para pacientes con alguna patología crónica

Sanos-deportistas	Paciente con enfermedad cardíaca	Paciente con enfermedad respiratoria	Otros
Deportistas de alto rendimiento (capacidad aeróbica, nivel de entrenamiento)	Falla cardíaca, eventual uso de resincronizador	Enfisema, fibrosis, fibrosis quística, hipertensión pulmonar	Disnea de origen incierto
Sanos previo a programa de entrenamiento	Evaluación pre-trasplante	Evaluación pre-trasplante	Sospecha enfermedad neuromuscular
	Rehabilitación	Rehabilitación	Calificación de incapacidad laboral-pensión de invalidez
	Evaluación de riesgo quirúrgico (cirugía torácica o abdominal superior)	Evaluación de riesgo quirúrgico de cirugía torácica-cirugía resectiva, cirugía reducción de volumen, cirugía abdominal	Control del peso en enfermedades metabólicas

Adaptado de referencias 12,15,16-19.

$VO_2 peak$ con las complicaciones postoperatorias, así como también entre la pendiente del $VE/VCO_2 > 34$ y el riesgo de muerte postoperatoria²⁰⁻²².

Asma

Tanto en el diagnóstico de asma inducida por ejercicio como en los pacientes asmáticos, el CPET ha mostrado ser útil para la prescripción de programas de ejercicio específicos²³.

Enfermedad pulmonar difusa

El CPET ofrece una información más precisa y precoz que el TC6m al momento de prescribir rehabilitación o terapias específicas, así como en el control de estas, o en el momento de enlistar para trasplante²⁴.

Hipertensión arterial pulmonar

El CPET otorga información complementaria a la entregada por el TC6m, ya que el $VO_2 peak$ y la pendiente del VE/VCO_2 son predictores independientes de mortalidad²⁵.

Obesidad

Es posible determinar la carga de trabajo que presenta la máxima tasa de oxidación de grasas (*Fatmax*), de manera de orientar el nivel de entrenamiento y definir las cargas de trabajo²⁶. En los pacientes diabéticos no insulino-dependientes, se ha observado una correlación negativa entre el nivel de glicemia y la capacidad aeróbica, lo que pudiera ser de utilidad en una evaluación más precisa de su condición y en la prescripción de cargas de trabajo en el proceso de rehabilitación con énfasis en la medición del *Fatmax*²⁷.

Por otra parte, la evaluación del $VO_2 peak$ es relevante en el seguimiento del tratamiento médico y para la prescripción de cirugía bariátrica. Además, es importante considerar un $VO_2 peak \leq 14,5$ ml/kg/min como indicador pronóstico de complicaciones postoperatorias^{28,29}.

Evaluación preoperatoria

En la evaluación previa a cirugía resectiva pulmonar es fundamental para predecir y minimizar la morbilidad perioperatoria y evitar rechazar enfermos oncológicos resecables, permitiendo la evaluación en candidatos a cirugía que presentan espirometría y difusión subnormal^{30,31}. El CPET ha permitido distinguir con mayor precisión los pacientes de mayor riesgo quirúrgico

($VO_2 peak < 10$ ml/kg/min o $< 35\%$ del predictivo y $VE/VCO_2 > 34$)^{30,31}.

Otros

Se utiliza con fines médico-legales y laborales para evaluar incapacidad física parcial o total³².

Valor pronóstico del TCP

El CPET ha demostrado ser útil frente a la necesidad de una intervención, terapia o procedimiento, brindando información pronóstica de evolución y sobrevida. De todas las variables que aporta el CPET, el VO_2 y el VE/VCO_2 son las que más se han asociado independientemente con el pronóstico, ya que integran aspectos ventilatorios, circulatorios y metabólicos¹⁰. Su beneficio está demostrado en pacientes con insuficiencia cardíaca, hipertensión pulmonar, cirugía de resección pulmonar, cirugía bariátrica, trasplante renal, EPOC y fibrosis quística^{7,8,33,34}.

Los parámetros para utilizar como valor pronóstico acorde a cada condición se detallan en la Tabla 5. A continuación, se detallan algunas patologías en las que el CPET contribuye a la valoración pronóstica.

Insuficiencia cardíaca

Un $VO_2 peak < 14$ ml/kg/min es un punto de corte para referir a una evaluación pretrasplante en pacientes con falla cardíaca, en tanto que aquellos con $VO_2 peak > 18$ ml/kg/min muestran una sobrevida igual o mejor que la esperada con trasplante³⁵. Se ha reportado que la combinación de VO_2 al UA < 11 ml/kg/min y un $VE/VO_2 > 34$ es un mejor indicador de alto riesgo de mortalidad en falla cardíaca³⁵.

Hipertensión pulmonar

Se ha demostrado en pacientes con hipertensión pulmonar que valores de $VO_2 < 11$ ml/kg/min con un $VE/VCO_2 > 45$ se asocia a una mortalidad de 10% al año³⁴.

EPOC

Valores de $VO_2 peak < 10$ ml/kg/min se ha correlacionado con una mortalidad de 60% a 5 años³³. También se ha asociado una reducción significativa de la sobrevida la presencia de un $VE/VCO_2 > 34$ ^{36,37}.

Tabla 5. Principales indicadores pronósticos según patología en TCP

Condición de salud	Variable pronóstica Punto corte VO_2 peak (ml/kg/min) o de equivalente ventilatorio CO_2 (VE/ VCO_2)	Interpretación
Insuficiencia cardíaca	$VO_2 < 11$ al UA $VO_2 < 14$ $VE/VCO_2 > 34$	Se consideran de alto riesgo de mortalidad Es un criterio para enlistar para evaluación de trasplante
Falla cardíaca	VO_2 al AT < 11 $VE/VCO_2 > 34$	Mayor mortalidad
Hipertensión pulmonar	$VO_2 < 11$ ($< 35\%$) VE/VCO_2 slope > 45	10% mortalidad anual (HAP1 y HAP2)
Enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC)	$VO_2 < 10$ $VE/VCO_2 > 34$	Indicadores ambos de mortalidad a cinco años
Fibrosis pulmonar Idiopática	$VO_2 < 13,8$ $VE/VCO_2 > 45$	Mayor mortalidad
Fibrosis quística	$VO_2 < 14$ ml/kg/min o $< 58\%$ del valor predeterminado	Indicación para realizar trasplante bipulmonar
Cirugía abdominal, colorrectal, biliar, urológica, vascular	$VO_2 < 11$ al AT	Se asocia a mayor morbimortalidad
Cirugía de resección de pulmón	$VO_2 < 10$ VO_2 entre 10-20 $VO_2 \geq 20$ $VE/VCO_2 > 34$	Muy elevado riesgo de cirugía resectiva Riesgo moderado. Si se asocia a: - $VE/VCO_2 < 34$: riesgo bajo - $VE/VCO_2 > 34$: riesgo alto Riesgo aceptable para realizar neumonecto- mía o lobectomía Asociación independiente con mortalidad postoperatoria
Cirugía bariátrica	$VO_2 < 14,5$	Factor de riesgo mayor para complicaciones postcirugía

Adaptado de referencias 3, 5-8, 20, 24, 31, 37.

Fibrosis pulmonar idiopática

Existe evidencia en pacientes con esta patología que un VO_2 peak $\leq 13,8$ ml/kg/min en conjunto con $VE/VCO_2 > 45$ sería indicador de una mayor mortalidad^{24,38}.

Evaluación preoperatoria de cirugía resectiva torácica

El aporte del CPET en la cirugía resectiva torácica, especialmente en cáncer de pulmón, ha sido crucial para estratificar riesgo y predecir complicaciones en el postoperatorio. Se ha consensuado que un VO_2 peak < 10 ml/kg/min indica un alto riesgo quirúrgico, pudiendo ser un criterio de exclusión del procedimiento; mientras que VO_2 peak > 20 ml/kg/min sugiere un riesgo estándar, aceptable incluso para neumonectomía^{30,39-41}. En los

casos intermedios, entre VO_2 10-20 ml/k/min, es el $VE/VCO_2 > 34$ el que discrimina un mayor riesgo de mortalidad. En casos de riesgo elevado, toma relevancia efectuar una rehabilitación intensiva con niveles de trabajo entre 55-75% del VO_2 peak alcanzado en el estudio basal y se sugiere repetir el CPET⁴⁰ en pocas semanas, esperando una mejor chance quirúrgica³⁹⁻⁴¹ (Tabla 5). Al respecto, en los casos de repetición CPET (para cualquier indicación), se estima que una variación inter-ensayo entre 5-10% del VO_2 es aceptable^{15,42-44}.

Principios de la interpretación del TCP

Los resultados de esta prueba dependen de la función de los sistemas que determinan el VO_2 ,

Tabla 6. Patrones fisiológicos asociados con diferentes diagnósticos

Variable	Des-acondicionamiento	Insuficiencia cardíaca crónica	Enfermedad pulmonar	Hipertensión pulmonar	Enfermedad mitocondrial
VO ₂ peak	↓	↓	↓	↓	↓
Umbral anaeróbico	Precoz (< 30% VO ₂ peak)	Precoz (< 30% VO ₂ peak)	Normal (40-60% VO ₂ peak)	Normal (40-60% VO ₂ peak)	Normal (40-60% VO ₂ peak)
VO ₂ /carga	Normal (pendiente = 10)	↓ (pendiente < 10)	↓ (pendiente < 10)	↓ (pendiente < 10)	↓ (pendiente < 10)
Pulso O ₂	Normal	↓	Normal	Normal	Normal
VE/CO ₂ slope	Normal 20-30	↑ (30-60)	↑ (30-60)	↑ (> 40)	Normal
Reserva ventilatoria	Normal	Normal	↓	Normal (o ↓)	Normal
SatO ₂	Normal	Normal	↓	Normal (o ↓)	Normal
PET CO ₂	Normal	↓	↓ (30-40 mm)	↓ (30 mm)	Normal
VE/VO ₂ slope	Normal	Normal	Normal	Normal	↑ (> 100)

↓: disminuido; ↑: aumentado; adaptado de referencias 15,46.

por lo tanto es muy importante reconocer si la limitación tiene origen cardiovascular, respiratorio o de ambos sistemas^{45,46}. Para esto deben conocer los patrones fisiológicos asociados a diferentes diagnósticos, comparando los datos resultantes del CPET con los valores de normalidad, resumidos en la Tabla 6^{45,46}. Además, para una correcta interpretación de la prueba siempre es necesario tener en consideración los puntos a continuación señalados, fundamentales para una correcta valoración clínica y cardiorrespiratoria^{39,40}:

- Motivo de realización del TCP.
- Información clínica del paciente.
- Estado funcional del paciente.
- Causa del término de la prueba.
- Resultados de las diferentes variables en comparación con los valores de referencia (Tabla 7).

Los resultados obtenidos en el CPET permiten planificar estrategias de entrenamiento y elección de las cargas de trabajo (tomando como 100% el VO₂ peak obtenido), así el porcentaje a trabajar dependerá de los objetivos terapéuticos de cada paciente. Las cargas propuestas normalmente son entre 55-75% del VO₂ peak y se recomienda controlar y readecuar cargas cada 2 a 4 semanas, supervisando por un mínimo de 12 semanas para

Tabla 7. Valores normales en el CPET

Variable	Criterio de normalidad
VO ₂ peak o VO ₂ max	> 84% predictivo
Umbral anaeróbico	> 40% VO ₂ max predicho (40-80%)
Frecuencia cardíaca	> 90% de la predictiva para la edad+
Reserva cardíaca	< 15 latidos/min
Presión arterial	< 220/90 mmHg
Pulso de oxígeno	> 80%
Reserva ventilatoria	VVmax*-VEmax > 11 lt o VEmax/VVmax < 0,85
Frecuencia respiratoria	< 60 resp/min
VE/CO ₂ al umbral	< 34
VD**/VT***	< 0,28; < 0,30 en mayores de 40 años

*VVmax: ventilación voluntaria máxima; **VD: volumen muerto; ***VT: volumen corriente, Frecuencia cardíaca máxima: 220-edad. Adaptado de referencia 15.

posteriormente dar paso al entrenamiento autónomo de cada paciente¹².

Finalmente, es relevante informar si el examen es normal, lo que implica una capacidad aeróbica adecuada; o si es anormal, y –de ser así– aportar

una aproximación al probable origen de la limitación (cardíaco, respiratorio, muscular o neuropsicológico), dadas las implicancias operativas que ello conlleva⁴⁵.

Conclusión

Los exámenes estáticos utilizados masivamente hasta la fecha como pruebas de función cardíaca y pulmonar no proporcionan mayor información sobre el rendimiento o eficiencia cardiorrespiratoria, ya que no evalúan de manera dinámica las variaciones de los parámetros fisiológicos asociadas a la generación de disnea, fatiga e intolerancia a la actividad física. En contraste, el CPET es una herramienta efectiva y segura para evaluar la capacidad funcional y la tolerancia al ejercicio, tanto en sujetos sanos como en pacientes con diferentes patologías, especialmente cardiopulmonares, puesto que permite determinar indicadores tales como VO_2 , VE/VCO_2 y UA, sensibles al funcionamiento y adaptación cardiorrespiratoria.

De acuerdo con lo anterior, el CPET es capaz de proporcionar información relevante en un amplio espectro de situaciones, desde la evaluación del rendimiento físico en deportistas hasta la toma de decisiones sobre intervenciones farmacológicas o quirúrgicas en pacientes con patologías crónicas complejas. En consecuencia, los profesionales clínicos de distintas áreas deben tener conocimiento sobre la aplicación, interpretación y utilidad de esta prueba, que en la actualidad se encuentra enormemente subutilizada en relación con la potencialidad diagnóstica, pronóstica y de seguimiento de pacientes que ha demostrado poseer.

Agradecimientos: A las tecnólogas médicas de la Clínica Santa María, por el valioso aporte en la ejecución de cada test, obtención y registro de datos, así como en la asistencia en los controles biológicos.

Referencias

- Campbell ML. Dyspnea. Crit Care Nurs Clin North Am 2017; 29 (4): 461-70.
- Alfonso M, Bustamante V, Cebollero P, Antón M, Herrero S, Gáldiz JB. Assessment of dyspnea and dynamic hyperinflation in male patients with chronic obstructive pulmonary disease during a six minute walk test and an incremental treadmill cardiorespiratory exercise test. Rev Port Pneumol 2017 (5): 266-72.
- Ross R, Blair SN, Arena R, Church T, Després JP, Franklin B, et al. Importance of assessing cardiorespiratory fitness in clinical practice: A Case for Fitness as a Clinical Vital Sign: A Scientific Statement from the American Heart Association. Circulation 2016; 134: 653-99.
- Kodama S, Saito K, Tanaka S, Maki M, Yachi Y, Asumi M, et al. Cardiorespiratory fitness as a quantitative predictor of all-Cause mortality and cardiovascular events in healthy men and women: a meta-analysis. JAMA 2009; 301: 2024-35.
- American College of Cardiology/American Heart Association Task Force on Assessment of Cardiovascular Procedures (Subcommittee on exercise testing). J Am Coll Cardiol 1986; 8: 725-38.
- Kaminsky L, Imboden M, Arenas R, Myers J. Reference Standards for Cardiorespiratory Fitness Measured With Cardiopulmonary Exercise Testing Using Cycle Ergometry: Data From the Fitness Registry and the Importance of Exercise National Database (FRIEND) Registry. Mayo Clin Proc 2017; 92 (2): 228-33.
- Balady GJ, Arena R, Sietsema K, Myers J, Coke L, Fletcher GF, et al. Clinician's Guide to cardiopulmonary exercise testing in adults: a scientific statement from the American Heart Association. Circulation 2010; 122: 191-225.
- Palange P, Ward SA, Carlsen KH, Casaburi R, Gallagher CG, Gosselink R, et al. Recommendations on the use of exercise testing in clinical practice. Eur Respir J 2007; 29: 185-209.
- Myers J. New American Heart Association/American College of Cardiology guidelines on cardiovascular risk: when will fitness get the recognition it deserves? Mayo Clin Proc 2014; 89: 722-6.
- Loprinzi PD. Estimated Cardiorespiratory Fitness Assessment as a Patient Vital Sign. Mayo Clin Proc 2018; 93: 821-3.
- Zagolin M. Ejercicio y pulmón" ¿Qué hemos aprendido en las jornadas de otoño 2012? Rev Chil Enferm Respir 2012; 28 N° 2: 87-93.
- Wasserman K, Hansen C, Stringer W, Sietsema K, Sun C, Whipp B. Principles of exercise testing and interpretation. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins; 2011.
- Arena R, Myers J, Aslam SS, Varughese E, Peberdy MA. Peak VO_2 and VE/VCO_2 slope in patients with heart failure: a prognostic comparison. Am Heart J 2004; 147: 354-60.

14. Mehani SHM, Abdeen HAA. Cardiopulmonary rehabilitation program impact on prognostic markers in selected patients with resting and exercise-induced ventilatory inefficiency: a clinical trial. *J Phys Ther Sci* 2017; 29 (10): 1803-10.
15. American Thoracic Society/ American College of Chest Physicians ATS/ACCP Statement on Cardiopulmonary Exercise Testing. *Am J Respir Crit Care Med* 2003; 167: 211-77.
16. Mezzani A, Agostoni P, Cohen-Solal A, Corrà U, Jegier A, Kouidi E, et al. Standards for the use of cardiopulmonary exercise testing for the functional evaluation of cardiac patients: a report from the Exercise Physiology Section of the European Association for Cardiovascular Prevention and Rehabilitation. *Eur J Cardiovasc Prev Rehabil* 2009; 16 (3): 249-67.
17. Arós F, Boraita A, Alegría E, Alonso A, Bardají A, Lamiel R. Guías de práctica clínica de la Sociedad Española de Cardiología en pruebas de esfuerzo. *Rev Esp Cardiol* 2000; 53: 1063-94.
18. Herdy AH, Ritt LE, Stein R, Araújo CG, Milani M, Meneghelo RS, et al. Cardiopulmonary Exercise Test: Background, Applicability and Interpretation. *Arq Bras Cardiol* 2016; 107 (5): 467-81.
19. Brunelli A, Kim AW, Berger KI, Addrizzo-Harris DJ. Physiologic evaluation of the patient with lung cancer being considered for resectional surgery: Diagnosis and management of lung cancer, 3rd ed: American College of Chest Physicians evidence-based clinical practice guidelines. *Chest* 2013; 143 (5): 166-90.
20. Torchio R, Guglielmo M, Giardino R, Ardisson F, Ciacco C, Gulotta C, et al. Exercise ventilatory inefficiency and mortality in patients with chronic obstructive pulmonary disease undergoing surgery for non-small-cell lung cancer. *Eur J of Cardiothorac Surg* 2010; 38 (1): 14-20.
21. Brunelli A, Charloux A, Bolliger CT, Rocco G, Sculier JP, Varela G, et al. The European Respiratory Society and European Society of Thoracic Surgeons clinical guidelines for evaluating fitness for radical treatment (surgery and chemoradiotherapy) in patients with lung cancer. *Eur J Cardiothorac Surg* 2009; 36: 181-4.
22. Shafiek H, Valera JL, Togores B, Torrecilla JA, Sauleda J, Cosío BG. Risk of postoperative complications in chronic obstructive lung disease patients considered fit for lung cancer surgery: beyond oxygen consumption. *Eur J Cardiothorac Surg* 2016; 50 (4): 772-9.
23. Joyner BL, Fiorino EK, Matta-Arroyo E, Needleman JP. Cardiopulmonary exercise testing in children and adolescents with asthma who report symptoms of exercise-induced bronchoconstriction. *J Asthma* 2006; 43 (9): 675-8.
24. Van der Plas MN, van Kan C, Blumenthal J, Jansen H, Wells A, Brassier P. Pulmonary vascular limitation to exercise and survival in idiopathic pulmonary fibrosis. *Respirology* 2014; 19: 269-75.
25. Galiè N, Humbert M, Vachiery JL, Gibbs S, Lang I, Torbicki A, et al. 2015 ESC/ERS Guidelines for the diagnosis and treatment of pulmonary hypertension. *Eur heart J* 2016; 37: 67-119.
26. Dandanell S, Præst CB, Søndergård SD, Skovborg C, Dela F, Larsen S, et al. Determination of the exercise intensity that elicits maximal fat oxidation in individuals with obesity. *Appl Physiol Nutr Metab* 2017; 42 (4): 405-12.
27. Uçok K, Yalcinkaya H, Acay A, Coban NF, Aslanalp S, Akkan G, et al. Do patients with newly diagnosed type 2 diabetes have impaired physical fitness, and energy expenditures? *Neth J Med.* 2015; 73 (6): 276-83.
28. Hennis PJ, Meale PM, Hurst RA, O'Doherty AF, Otto J, Kuper M, et al. Cardiopulmonary exercise testing predicts post-operative outcome in patients undergoing gastric bypass surgery. *BJA: Br J of Anaesth* 2012; 109 (4): 566-71.
29. Moran J, Wilson F, Guinan E, McCormick P, Hussey J, Moriarty J. Role of cardiopulmonary exercise testing as a risk-assessment method in patients undergoing intra-abdominal surgery: a systematic review. *Br J Anaesth* 2016; 116 (2): 177-91.
30. Harvie D, Levett D. Exercise testing for pre-operative evaluation. Chapter 14-ERS monograph 2018: 251-79.
31. Brunelli A, Belardinelli R, Refai M, Salati M, Socci L, Pompili C, et al. Peak oxygen consumption during cardiopulmonary exercise test improve risk stratification in candidates to mayor lung resection. *Chest* 2009; 135 (5): 1260-67.
32. Sue DY. Exercise testing in the evaluation of impairment and disability. *Clin Chest Med* 1994; 15: 369-87.
33. Chakkeri HA, Angadi SS, Heilman R, Kaplan B, Scott RL, Bollempalli H, et al. Cardiorespiratory Fitness (Peak Oxygen Uptake): Safe and Effective Measure for Cardiovascular Screening Before Kidney Transplant. *J Am Heart Assoc* 2018; 7 (11). DOI: 10.1161/JAHA.118.008662.
34. Wensel R, Opitz C, Anker S, Winkler J, Höffken G, Kleber F, et al. Assessment of survival in patients with primary pulmonary hypertension: importance of cardiopulmonary exercise testing. *Circulation* 2002; 106: 319-24.
35. Gitt AK, Wasserman K, Kilowski C, Kleemann T, Kilkowski A, Bangert M, Schneider S, Schwarz A, Senges J. Exercise anaerobic threshold and ventilatory efficiency

- identify heart failure patients for high risk of early death. *Circulation* 2002; 106: 3079-84.
36. Hiraga T, Maekura R, Okuda T, Okamoto T, Hirotsani A, Kitada S, Yoshimura K, Yokota S, Masami Ito M, Ogura T. Prognostic predictors for survival in patients with COPD using cardiopulmonary exercise testing. *Clin Physiol Funct Imaging* 2003; 23: 324-31
 37. Neder JA, Alharbi A, Berton DC, Alencar MC, Arbex F, Hirai D. Exercise ventilatory inefficiency adds to lung function in predicting mortality in COPD. *COPD* 2016; 13: 416-24.
 38. Vainshelboim B, Oliverira J, Fox BD, Weiss I, Fox BD, Fruchter O, et al. The prognostic role of ventilatory inefficiency and exercise capacity in idiopathic pulmonary fibrosis. *Respir Care* 2016; 61: 1100-109.
 39. Mehra M, Canter C, Hannan M, Semigran M, Uber P, David P, et al. The 2016 International Society for Heart Lung Transplantation Listing criteria for heart transplantation: a 10 year update. *J Heart Lung Transplant Off Publ Int Soc Heart Transplant* 2016; 35 (1): 1-23.
 40. Salati M, Brunelli A. Risk Stratification in Lung Resection. *Curr Surg Rep* 2016; 37: 5-9.
 41. Qanjer 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 Suppl* 1993; 6: 5-40.
 42. Tuyet Le VD. Cardiopulmonary Exercise Testing in Aortic Stenosis. *Dan Med J* 2017; 64 (5): B5352.
 43. Decato T, Bradley S, Wilson E, Hegewald M. Repeatability and Meaningful Change of CPET Parameters in Healthy Subjects. *Med Sci Sports Exerc* 2018; 50 (3): 589-95.
 44. Bensimhon D, Leifer E, Ellis S, Fleg J, Keteyian S, Piña I, et al. Reproducibility of Peak Oxygen Uptake and Other Cardiopulmonary Exercise Testing Parameters in Patients with Heart Failure (From the Heart Failure and A Controlled Trial Investigating Outcomes of exercise training). *Am J Cardiol* 2008; 102 (6): 712-17.
 45. Forman DE, Myers J, Lavie CJ, Guazzi M, Celli B, Arena R. Cardiopulmonary Exercise Testing: relevant but underused. *Post grad Med* 2010; 122 (6): 68-86.
 46. Cid-Juárez S, Reyes J, Cortés-Télles A, Gochicoa-Rangel A, Mora-Romero U, Silva-Cerón M, Torre-Bouscoulet L. Prueba cardiopulmonar de ejercicio. Recomendaciones y procedimiento. *Neumol Cir Torax* 2015; 74 (3): 207-21.