

Exploración funcional respiratoria: aplicación clínica

G. García de Vinuesa Broncano, G. García de Vinuesa Calvo

INTRODUCCIÓN

La evaluación de la función pulmonar es una herramienta esencial para los neumólogos por tener un papel trascendente, tanto en el diagnóstico, como en el seguimiento del tratamiento en la evaluación pronóstica de las enfermedades del aparato respiratorio (Tabla I).

Las pruebas de función respiratoria (PFR) son un conjunto de técnicas diagnósticas cuyo objetivo es estudiar los diversos aspectos del funcionamiento del aparato respiratorio. Proporcionan una información objetiva, precisa y fiable de muchos pacientes. Desde el punto de vista funcional, el aparato respiratorio constituye un sistema complejo en el que intervienen numerosas factores y variables físicas. Por tanto, para la comprensión, realización y correcta interpretación de las PFR es imprescindible que el lector tenga presentes conocimientos de fisiología respiratoria. A efectos prácticos podemos dividir las PFR en cinco grupos (Tabla II).

Dentro de estas técnicas, la espirometría constituye una técnica básica e imprescindible que juega un papel crucial dentro del estudio de la función pulmonar y con su evaluación podremos tomar muchas decisiones. Sin embargo, en muchas otras ocasiones la información aportada por la espirometría es insuficiente, por lo que debe ser complementada con otras herramientas distintas capaces de darnos información sobre otros aspectos de la función pulmonar.

ESPIROMETRÍA

Descripción

Podemos definir la espirometría como el análisis de los volúmenes pulmonares y flujos aéreos bajo circunstancias controladas. Es fácilmente repro-

Tabla I. Aplicaciones clínicas de las pruebas de función respiratoria

Diagnóstico

- Diagnóstico de enfermedades broncopulmonares: asma, EPOC...
- Diagnóstico diferencial de procesos broncopulmonares
- Estudio de disnea

Tratamiento

- Evaluación de la respuesta a tratamientos

Pronóstico

- Evaluación del pronóstico en la progresión de una enfermedad: neumopatías intersticiales, criterios de trasplante pulmonar...
- Evaluación de la operabilidad en cirugía de resección pulmonar: cáncer pulmón, cirugía de reducción de volumen...
- Evaluación del riesgo quirúrgico de otras intervenciones
- Evaluación de la capacidad laboral

Tabla II. Clasificación de las pruebas de función respiratoria

Estudio de la mecánica ventilatoria

- Espirometría
- Volúmenes pulmonares
- Resistencias
- Elasticidad y distensibilidad

Estudio del intercambio gaseoso

- Capacidad de difusión
- Gasometría arterial

Pruebas de hiperreactividad bronquial

- Test de broncodilatación
- Test de provocación bronquial o broncoconstricción
 - Inespecíficas: metacolina, histamina, adenosina, sustancias hiperosmolares, esfuerzo, aire seco
 - Específicas

Pruebas de esfuerzo

- Esfuerzo submáximo: 6 minutos marcha, prueba de lanzadera
- Esfuerzo máximo: cicloergómetro, tapiz rodante...

Estudios del control de la respiración

- Estudio del patrón ventilatorio
- Presión de oclusión
- Presiones musculares
- Estímulos químicos

ducible siempre que se cuente con un equipo adecuado y un técnico con suficiente experiencia.

Existen dos tipos de espirometría: espirometría simple y espirometría forzada. La espirometría simple es aquella que se realiza haciendo que el paciente, tras una inspiración forzada, expulse todo el volumen de aire posible sin límite de tiempo. La espirometría forzada es aquella en que se pide al paciente que expulse todo el aire contenido en los pulmones en el menor tiempo posible. Hoy día la espirometría forzada es la que tiene más importancia desde el punto de vista clínico y de ella nos ocuparemos en adelante. La espirometría simple actualmente sólo es útil para complementar los datos funcionales obtenidos mediante la espirometría forzada⁽¹⁻³⁾.

Se han utilizado para la espirometría dos tipos de aparatos: espirómetro y neumotacógrafo. El spi-

rómetro es un instrumento capaz de medir volúmenes pulmonares. El neumotacógrafo es un instrumento capaz de medir flujos aéreos. Hoy día los aparatos utilizados en la práctica integran ambos.

Determinación

Se obtiene pidiendo al paciente que realice una espiración lo más intensa, rápida y prolongada posible, tras una inspiración forzada. Una vez realizada esta operación podemos obtener una gráfica de volumen/tiempo y una gráfica de flujos/volumen (Figura 1) que nos van a ofrecer los parámetros espirométricos.

Es importante, antes de continuar, recordar una característica fundamental de estas gráficas obtenidas: salvo en su primera porción, la morfología es independiente de la voluntad del paciente, aunque varíe el esfuerzo que realice. Esto ocurrirá a partir del momento en que se igualen las presiones dentro y fuera de la vía aérea, al producirse un colapso de la vía aérea que lleva a una limitación dinámica al flujo aéreo. Este dato es de una gran importancia desde el punto de vista práctico.

Requisitos mínimos y recomendaciones

Para que una espirometría tenga validez debe cumplir una serie de requisitos desde el punto de vista técnico y de su realización⁽¹⁻³⁾.

- Desde el punto de vista técnico deben utilizarse equipos que cumplan las normas de estandarización establecidas por los organismos científicos (SEPAR, ATS/ERS). Habitualmente los cumplen.
- La maniobra de la realización debe cumplir los siguientes requisitos:
 - Comienzo brusco y expulsión continuada hasta alcanzar un flujo cero (menor de 25 ml/seg) incentivando para que el esfuerzo sea máximo. Si no se consiguiera se efectuará la medida del FEV1 y FEF25-75 extrapolación retrógrada de la curva de volumen/tiempo. El volumen extrapolado no deberá exceder del 5% de la FVC o 150 ml para ser considerado válido.
 - El tiempo de espiración ha de ser de 6 segundos, como mínimo.

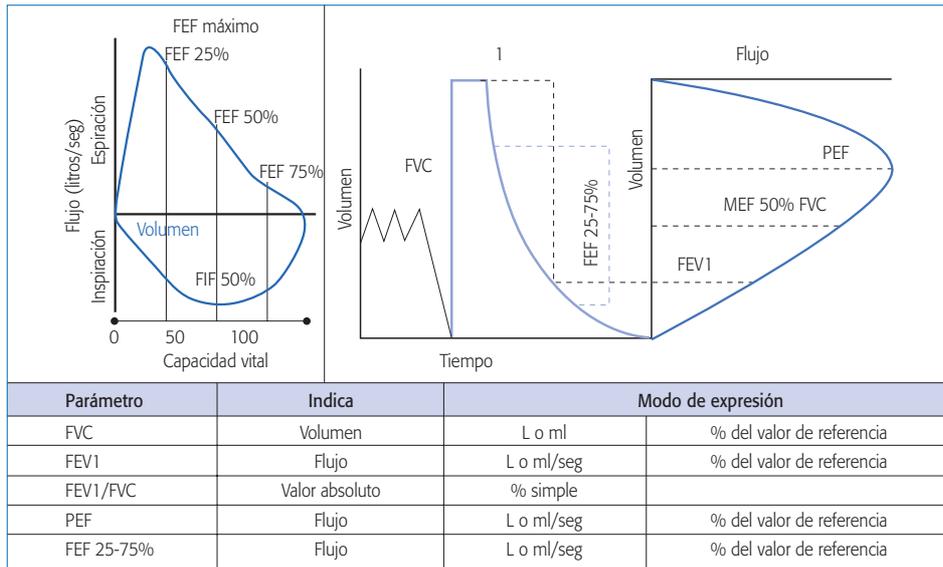


Figura 1. Gráficas flujo/volumen y volumen tiempo. Parámetros utilizados junto con sus unidades de expresión.

- No debe producirse amputación al final de la espiración.
- La calidad de la realización debe ser constatada mediante el análisis gráfico de la espirometría; es imprescindible para detectar fallos en la realización y saber si la maniobra ha sido correcta.
- Son precisas al menos dos maniobras cuya variabilidad del FVC y FEV1 sea menor del 5% o 200 ml.

Hasta no cumplir estos requisitos no debemos realizar la interpretación de la prueba.

Es recomendable que antes del día de la prueba el paciente sea advertido, por escrito y oralmente, de la conveniencia de evitar la administración de broncodilatadores en las horas previas al estudio. El uso de beta-2-adrenérgicos por aerosol deberá suspenderse durante las 6 h precedentes como mínimo y el de teofilinas o derivados con un mínimo de 12 o más horas antes de la prueba, lo que depende de que el preparado de teofilina sea de acción rápida o de liberación prolongada. Es aconsejable recordar a los pacientes que no es necesario el ayuno previo requerido para otras pruebas. Sin embargo, el enfermo debe abstenerse de fumar

en las horas anteriores a la prueba; es también aconsejable evitar las comidas abundantes y las bebidas con contenido en cafeína en las horas previas. Particularmente importante y útil a la vez resulta la explicación del médico al paciente de la razón del estudio, en qué consiste y qué se espera que él ponga de su parte, al tiempo que advertirle de la necesidad por parte del técnico de dar una orden enérgica para facilitar la espiración súbita del aire.

Interpretación y aplicación clínica

Parámetros

En primer lugar, hemos de describir los parámetros que utilizaremos (Figura 1).

- Capacidad vital forzada (*Forced Vital Capacity*) (FVC): volumen de aire expulsado mediante una espiración forzada.
- Volumen espiratorio máximo espirado en el primer segundo (*Forced Expiratory Volume*) (FEV1): volumen de aire expulsado en el primer segundo de la espiración forzada.
- Relación FEV1/FVC: relación porcentual entre FEV1 y FVC. No debe ser confundido con el índice de Tiffeneau (relación FEV1/VC), dado

que en circunstancias patológicas la FVC puede ser inferior a la VC debido al colapso dinámico de la vía aérea.

- Flujo espiratorio máximo entre el 25% y el 75% de la FVC (*Forced Expiratory Flow 25-75*) (FEF25-75%): relación entre el volumen expulsado entre el 25 y el 75% de la FVC y el tiempo que se ha tardado en expulsarlo.
- Flujo espiratorio máximo o flujo pico (*Peak Expiratory Flow*) (PEF): máximo flujo conseguido durante la espiración forzada.

Expresión de los resultados

Los resultados de la espirometría deben expresarse en forma numérica y gráfica. Para la expresión numérica suelen utilizarse tres columnas: en la primera se anotan los valores de referencia para cada variable, en la segunda, los valores obtenidos en el paciente y, en la tercera, el porcentaje de los valores medidos con relación a los de referencia⁽⁴⁾. Para la representación gráfica es mejor el trazado de flujo/volumen, con el bucle completo.

No existe un valor único para los diferentes parámetros de la espirometría. A partir de estudios epidemiológicos se han hecho ecuaciones de predicción para los diferentes parámetros espirométricos a través de las cuales obtenemos los valores de referencia que varían en razón de sexo, edad, talla, raza y peso del paciente.

Los valores de la espirometría se pueden expresar como valor absoluto o en porcentaje sobre el valor teórico de referencia. Se considerarán patológicos cuando se encuentren por debajo de los valores que se establecen como normales. Estos valores son diferentes para los distintos parámetros estudiados. Para FVC y FEV1, el 80%; para FEV1/FVC entre el 70 y el 85% y para el FEF25-75, el 60%.

Es muy bueno recordar que, aunque para el diagnóstico es importante el porcentaje sobre el valor de referencia, para el seguimiento y evolución de los pacientes enfermos son destacados los valores absolutos y su variación.

Alteraciones ventilatorias

El análisis de la espirometría nos permite establecer la existencia o no de una alteración ventila-

toria significativa y, caso de existir, clasificarlas en tres tipos: obstructiva, restrictiva, mixta y obstrucción de vía aérea central o vías aéreas superiores⁽⁵⁻⁷⁾. Todas ellas aparecen expresadas gráficamente en la Figura 2.

Alteración ventilatoria obstructiva

Se produce en las enfermedades que cursan con limitación al flujo aéreo, bien causada por aumento de la resistencia de las vías aéreas, como es el caso de la EPOC o del asma, o por disminución de la retracción elástica del pulmón, como ocurre en el enfisema, o por la combinación de ambas causas.

La gráfica espirométrica de estos pacientes adquiere una forma característica con disminución del pico máximo y retardo en la caída.

Se caracteriza por disminución de FEV1, FEV1/FVC (el valor hallado ha de ser menor del 70%) y FEF25-75%. La FVC se encontrará normal o ligeramente disminuida. Según la intensidad de la alteración se establecen los grados de gravedad de la obstrucción (Tabla III).

Alteración ventilatoria restrictiva

Se produce en las enfermedades que cursan con disminución del volumen pulmonar, que puede ser debida a alteraciones del parénquima pulmonar, de la caja torácica o de la musculatura respiratoria y su inervación.

La gráfica espirométrica muestra una disminución global de tamaño con una morfología normal.

Se caracteriza por disminución de la FVC y aumento de la relación FEV1/FVC (ha de ser mayor del 85%). Los flujos pueden estar normales o ligeramente disminuidos.

En la alteración restrictiva es donde los volúmenes estáticos aportan datos suplementarios valiosos. Según la intensidad de la alteración se establecen los grados de gravedad de la restricción (Tabla III).

Alteración ventilatoria mixta

Se mezclan características de los dos patrones anteriormente comentados. Para saber con más precisión el grado de alteración de cada componente debemos utilizar los volúmenes pulmonares estáticos.

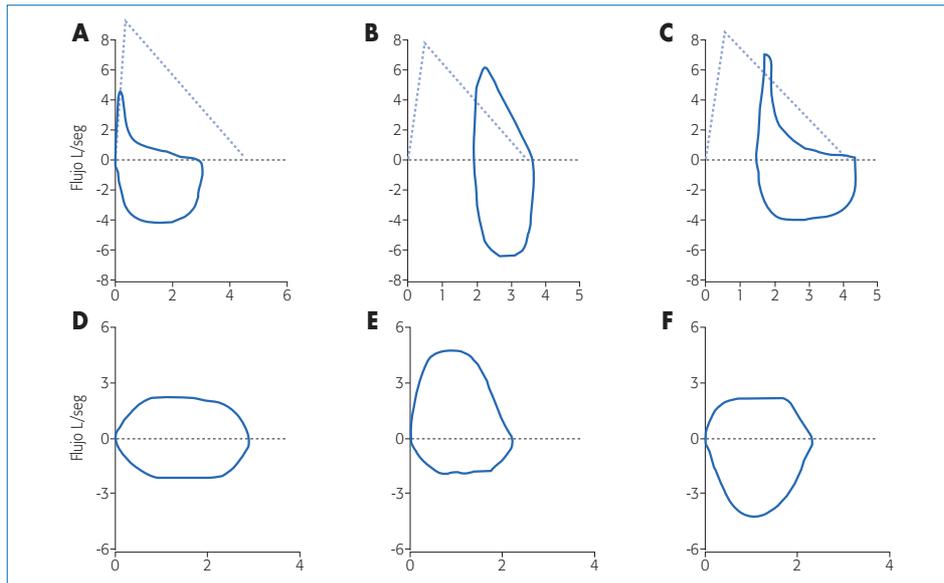


Figura 2. Representaciones de los principales trastornos espirométricos en curvas de flujo volumen. A) Trastorno obstructivo. B) Trastorno restrictivo. C) Trastorno mixto. D) Obstrucción fija central o de vías aéreas superiores. E) Obstrucción variable extratorácica. F) Obstrucción variable intratorácica.

Tabla III. Principales clasificaciones de gravedad en las alteraciones ventilatorias			
Trastorno obstructivo		Trastorno restrictivo	
<i>American Thoracic Society</i>		<i>American Thoracic Society</i>	
	<i>FEV1</i>		<i>FVC</i>
Leve	> 70%	Leve	> 70%
Moderada	60-69%	Moderada	60-70%
Moderadamente grave	50-59%	Moderadamente grave	50-60%
Grave	35-49%	Grave	34-50%
Muy grave	< 35%	Muy grave	< 34%
SEPAR		SEPAR	
	<i>FEV1</i>		<i>TLC</i>
Leve	> 65%	Leve	70-80%
Moderada	50-65%	Moderada	60-70%
Grave	35-50%	Grave	< 60%
Muy grave	< 35%		

Obstrucción vía aérea central

El análisis adecuado de la morfología de la curva espirométrica nos puede permitir la detección de estenosis de vías altas (laringe y tráquea), tanto por afectación intratorácica como por extratorácica.

Contraindicaciones

- Imposibilidad de realización de maniobra correcta (niños, ancianos, estado físico o mental deteriorado, falta de colaboración).
- TBC pulmonar activa.

- Angor reciente.
- Neumotórax reciente.
- Desprendimiento de retina o cirugía de cataratas reciente.
- Como impedimentos relativos se cuentan la traqueostomía, en particular la que está mal cuidada, con exceso de secreciones, los problemas bucales, las hemiparesias faciales y el caso raro en que la introducción de la boquilla provoca náuseas e intolerancia en el paciente.

Complicaciones

- Broncoespasmo y accesos de tos.
- Dolor torácico.
- Aumento de presión intracraneal.
- Neumotórax.
- Síncope.

TEST DE BRONCODILATACIÓN⁽⁵⁻⁷⁾

Cuando hablamos de test de broncodilatación y test de broncoconstricción hablamos de hiperreactividad bronquial (HRB). Entendemos por hiperreactividad bronquial a la hiperrespuesta ante múltiples estímulos (debida a una disminución de umbral de respuesta del músculo liso bronquial ante dichos estímulos). Esa hiperrespuesta se expresa clínicamente como broncoespasmo.

Prueba broncodilatadora

Descripción y determinación

Consiste en la realización de una segunda espirometría 15 minutos después de la inhalación de un broncodilatador beta-adrenérgico de acción rápida a dosis terapéuticas. La técnica es igual a la utilizada en la espirometría basal.

Estará indicada siempre que queramos valorar HRB o respuesta terapéutica a broncodilatadores. Hoy día se aconseja su incorporación rutinaria a la espirometría.

Interpretación

La consideraremos positiva cuando: FVC obtenga un aumento mayor del 7% del valor en la espirometría basal, FEV1 obtenga un aumento mayor de 11% del valor en la espirometría basal o FEF25-

75% obtenga un aumento mayor del 35% del valor en la espirometría basal.

La PBD es un prueba de gran especificidad pero de baja sensibilidad. Así pues, es importante considerar que:

- Una PBD positiva siempre habla de HRB (que habrá de valorarse a la luz de la información clínica).
- Una PBD negativo no excluye la existencia de HRB (asimismo debe ser valorada con la clínica, pudiendo precisar otras pruebas de HRB inespecífica).

Test de provocación bronquial⁽⁸⁾

Descripción y clasificación

Este test está indicado para el estudio de la HRB en pacientes con clínica sugerente que presentan espirometría normal y PBD negativa. Pretende provocar un broncoespasmo controlado y detectable mediante la inhalación de diferentes sustancias o la realización de determinadas maniobras que tienen como consecuencia una acción broncoconstrictora conocida.

Según si el test investiga o no el agente etiológico específico que produce la HRB los test de provocación se clasifican en específicos e inespecíficos.

- Los **test específicos** utilizan como estímulo el agente probablemente responsable de la etiología de la HRB. Proporciona una información de tipo cualitativo y entraña en riesgo en su hipirrespuesta inmediata o retardada, por lo que debe realizarse en adecuado ambiente intrahospitalario con las debidas precauciones.
- Los **test inespecíficos** utilizan como estímulos sustancias farmacológicas (metacolina, histamina, adenosina, sustancias hiperosmolares) o agentes físicos (esfuerzo, aire frío y seco). La información es sólo cuantitativa, es decir, nos dice si existe HRB y, si es así, en qué medida existe. La elección de una u otra sustancia va a depender de cada laboratorio, aunque el más extendido es el test de metacolina. En general existe buena correlación entre los diferentes test.

Determinación

Para realizar este test se realiza una espirometría basal; posteriormente se administra la sustancia, o se realiza la maniobra, y se hace una nueva espirometría comparando los resultados.

Los parámetros habitualmente utilizados son el FEV1, muy reproducible y poco sensible o la conductancia específica (sGaw), muy sensible y poco reproducible, aunque se han utilizado otros como el V50 o FEF25-75% y otros.

El test más extendido es el test de metacolina y a él nos referiremos en adelante.

Interpretación

En este test la respuesta puede establecerse de dos maneras: como dosis de provocación o como curva dosis-respuesta.

En el primer caso tendremos en cuenta la dosis de metacolina capaz de producir una broncoconstricción significativa. Esta dosis suele indicarse con las siglas PD (*Provocation Dose*) seguida de un número, a modo de índice que expresa el valor, en %, de caída de FEV1 establecido como significativo para considerar la prueba positiva.

La aceptada PD20 pondría de manifiesto la cantidad de metacolina necesaria para reducir un 20% el FEV1 desde su valor basal. La dosis empleada suele expresarse como unidades inhalatorias (inhalación de una solución que contenga 1 mg de agente activo por ml). Cuanto más hiperreactivo es el individuo, más pequeña será la dosis necesaria para alcanzar el PD20. Cuando se utiliza el valor de la sGaw, que es más variable, se utiliza como porcentaje el 35%.

En el segundo caso, si analizamos la curva dosis-respuesta, analizaremos la sensibilidad (dosis de provocación) y la reactividad (intensidad y progresión de la respuesta broncoconstrictora una vez que se ha desencadenado).

Los valores de referencia, dada la variabilidad de la metodología, deben establecerse con exactitud en cada laboratorio. Es muy importante tener en cuenta que no existan factores que puedan alterar la HRB al realizar la prueba (beta-adrenérgicos, anticolinérgicos, infecciones respiratorias, sensibilizantes externos...).

La interpretación final del test sería la siguiente:

- Una respuesta positiva confirma el diagnóstico de HRB. Recordar que se trata de un fenómeno muy inespecífico y plurietiológico (asma, EPOC, bronquiectasias, infecciones respiratorias, tóxicos...).
- Una respuesta negativa indica que la HRB no es causa de los síntomas del paciente.

Aplicaciones clínicas

- Diagnóstico de pacientes con historia clínica indicativa de asma y cuya espirometría muestra valores de referencia o ligeramente obstructivos y test broncodilatador negativo.
- Evaluación de la eficacia de medidas preventivas y terapéuticas en diversas enfermedades respiratorias que cursan con HRB: asma, EPOC, etc.
- Estimación de la hiperrespuesta bronquial tras infección respiratoria o inmunización reciente.
- Estudio del componente de hiperrespuesta bronquial en enfermedades de otros órganos o sistemas.
- Estudio de la hiperrespuesta secundaria al tabaco y otros irritantes (ozono SO₂, polivinilo, dimetiletanol amina).
- Estudios epidemiológicos de agentes laborales y polucionantes. Valoración médico-laboral previa al empleo expuesto a TDI (disocianato de tolueno), pino rojo, etc.

Contraindicaciones

Absolutas

- Limitación basal al flujo aéreo severa (FEV1 < 40% valor referencia).
- Infarto de miocardio reciente (< 3 meses) o angor inestable.
- Accidente cerebrovascular reciente (< 3 meses).
- Enfermedad aneurismática arterial.
- Hipersensibilidad a la histamina o fármacos colinómiméticos (cuando se empleen dichos fármacos).
- Arritmia severa.

Relativas

- Obstrucción de la vía aérea inducida por las maniobras forzadas de la espirometría.

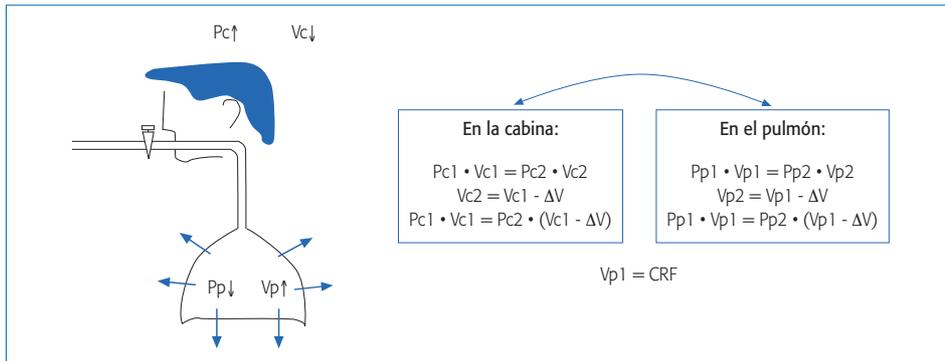


Figura 3. Técnica de determinación de volúmenes por pletismografía. Tras unas respiraciones normales, el sujeto respira contra una boquilla cerrada. Al inspirar, el sujeto expande el tórax con lo que el volumen del mismo aumenta (V_p), pero, al no entrar aire, la presión (P_p) disminuye. En este proceso la presión en la caja antes y después del movimiento espiratorio (P_{c1} y P_{c2}) las podemos medir y conocemos el volumen de la caja antes de la respiración (V_{c1}), por lo que podemos determinar el incremento del volumen que se produce siguiendo la ley de Boyle. Este incremento se puede aplicar a la misma fórmula referida a los cambios en el pulmón, calculando el volumen pulmonar antes del movimiento respiratorio, que es la FRC.

- Moderada limitación al flujo aéreo con $FEV1 < 60\%$ del valor de referencia.
- Asma agudizada.
- Hipertensión arterial no controlada.
- Infección reciente del tracto respiratorio superior (4-6 semanas).
- Embarazo.
- Epilepsia que requiere tratamiento.

Complicaciones

Habitualmente son muy raras, pudiendo aparecer sobre todo por el frío y el esfuerzo: espasmos de glotis y coronario. Es de destacar la ausencia de complicaciones cuando se utilizan fármacos broncoconstrictores. Los mayores descensos en los parámetros espirométricos se observan en niños y en pacientes con clínica previa. El tratamiento con broncodilatadores de acción rápida es muy eficaz.

VOLÚMENES PULMONARES ESTÁTICOS

Descripción

Desde un punto de vista funcional, podemos dividir los volúmenes pulmonares en dinámicos, aquellos que se movilizan con la respiración, y estáticos, aquellos que no se movilizan⁽⁹⁾, que son el volumen residual (VR) y todas las capacidades pulmonares que lo incluyen como uno de sus com-

ponentes, a saber, capacidad residual funcional (CRF) y capacidad pulmonar total (CPT).

Determinación

Al ser el VR un volumen que no se puede espirar, no se puede medir mediante espirometría, por lo que tenemos que recurrir a otros procedimientos. Se han descrito diversas técnicas para determinar los volúmenes estáticos, pero los principales son dos: la pletismografía corporal y el método de dilución de los gases⁽¹⁰⁾.

Pletismografía corporal

La palabra pletismografía deriva del griego *plethusmos* (agrandamiento). Es el método más preciso y estima el volumen de gas compresible dentro del tórax⁽¹¹⁾. Se fundamenta en la ley de Boyle, que dice que en un sistema cerrado a temperatura constante el producto de la presión (P) por el volumen (V) del gas es siempre constante (k). Matemáticamente: $P \cdot V = k$; por lo que, si en un sistema cerrado cambiamos P o V, como su producto permanece constante, entonces el producto $P \cdot V$ antes del cambio tiene que ser igual a $P \cdot V$ después del mismo, o sea, $P1 \cdot V1 = P2 \cdot V2$. En el pletismógrafo el aparato respiratorio se convierte en un circuito cerrado en el que se cumple esa ley (Figura 3).

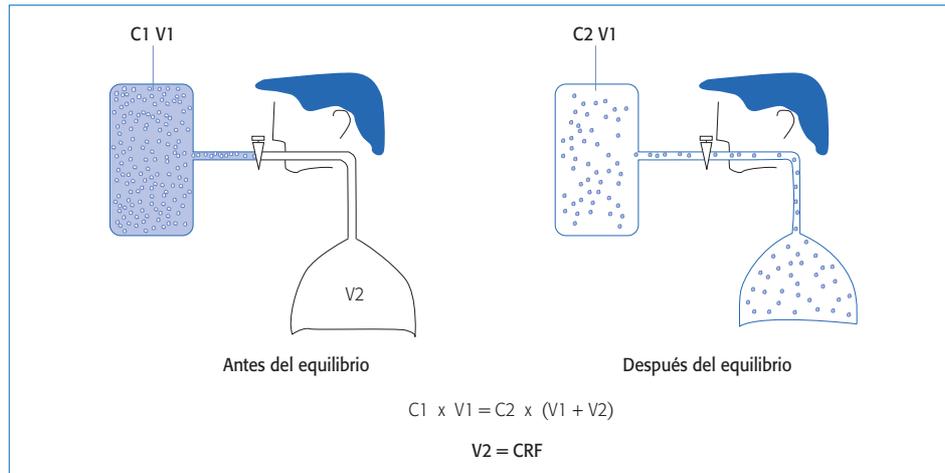


Figura 4. Técnica de determinación de volúmenes por dilución de gases.

Existen tres tipos de pletismógrafos:

- Pletismógrafo corporal de volumen constante. Es el más utilizado en la clínica y al que nos referiremos en este capítulo. Este pletismógrafo mide los cambios de presión que se producen dentro de una cabina a volumen constante.
- Pletismógrafo corporal de presión constante. El pletismógrafo mide los cambios de volumen que se producen dentro de una cabina a presión constante.
- Pletismógrafo corporal transmural o de flujo. Es más reciente. Mide cambios tanto de presión como de volumen.

Entre las ventajas del pletismógrafo frente al método de dilución de gases figuran que el primero es un método más preciso, más reproducible y más rápido y que la presencia de alvéolos mal ventilados no afecta a su medición. Además, permite medir simultáneamente la resistencia de la vía aérea (véase más adelante). Por el contrario, es una técnica más cara, que requiere más espacio físico y que precisa de otro dispositivo para realizar las pruebas de difusión (véase más adelante).

Método de dilución de los gases

Probablemente sea el método más extendido. Con esta técnica el paciente inhala un volumen de gas conocido ($V1$) que contiene una concentración

conocida ($C1$) de un gas inerte que no es soluble en los tejidos, generalmente helio (He).

Mediante técnicas de respiración única o múltiples (Figura 4), el He se va mezclando con el aire del pulmón y su concentración disminuye, lo que permite el cálculo de los volúmenes estáticos ($V2$) en función de la concentración del gas inerte que haya quedado tras la respiración ($C2$), mediante la siguiente relación:

$$C1 \times V1 = C2 \times (V1 + V2)$$

Entre sus ventajas figuran que suele requerir algo menos de espacio físico, que es más barato y que el dispositivo se puede usar para las pruebas de difusión (véase más adelante). Por el contrario, es un procedimiento más lento, ya que el equilibrio de la nueva concentración ($C2$) se suele alcanzar entre los 5 y 10 minutos tras iniciar la maniobra, y tiende a infravalorar los volúmenes en pacientes con obstrucción de la vía aérea, ya que los alvéolos mal ventilados no participan en la difusión del gas inerte. Aunque, debido al tiempo invertido en la exploración durante la técnica se tiene que suministrar oxígeno y retirar el carbónico mientras el paciente respira del dispositivo, no se ha demostrado que produzcan una hipoxemia clínicamente significativa, por lo que no es necesario hacer determinaciones de la saturación arterial de oxígeno tras su realización.

Interpretación y aplicación clínica

La medición de volúmenes pulmonares estáticos aporta una información complementaria a la espirometría. Al igual que con la espirometría, para interpretar correctamente los resultados habrá que asegurarse de que el paciente realizó un estudio válido. Para ello utilizamos la valoración subjetiva del técnico y la reproducibilidad de la capacidad inspiratoria⁽¹⁰⁾. El resultado se expresa en valor absoluto y como porcentaje de su valor de referencia. Sus principales aplicaciones clínicas son:

- El estudio de los patrones espirométricos restrictivos y mixtos (con un componente restrictivo y otro obstructivo). Al ser una PFR no esfuerzo dependiente e incluir al VR, puede determinar si el componente restrictivo se debe a una falta de colaboración del paciente, a una verdadera restricción pulmonar o a un aumento del VR por atrapamiento aéreo (Figura 5). El estudio de los patrones espirométricos restrictivos se puede también complementar con el estudio de la distensibilidad del pulmón y las pruebas de difusión (véase más adelante).
- Detección precoz de enfermedad bronquial. Otra aplicación de la determinación de los volúmenes es estudiar precozmente la obstrucción al flujo aéreo, ya que la obstrucción crónica al flujo puede comenzar con atrapamiento aéreo y aumento del VR como única alteración funcional (Figura 5), manteniendo una espirometría y resistencias normales.

RESISTENCIAS PULMONARES

Descripción

La resistencia es el impedimento que encuentra el aire para ventilar los pulmones. Esta resistencia al paso del aire se encuentra en dos estructuras, la vía aérea y el parénquima, con dos mecanismos de acción distintos. La vía aérea presenta una resistencia por el roce del aire inspirado con las paredes de la misma, por lo que se denomina resistencia resistiva o, simplemente, resistencia (*Raw*, del inglés *airway resistance*). Por otro lado, el parénquima también presenta una resistencia a la distensión debido a la tendencia al colapso que tiene. Es la llamada resistencia

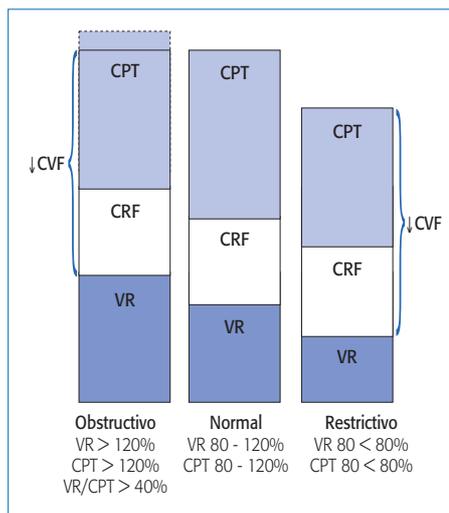


Figura 5. Estudio del patrón restrictivo en los volúmenes pulmonares estáticos (CVF: capacidad vital forzada; CPT: capacidad pulmonar total; CRF: capacidad residual funcional; VR: volumen residual).

elástica. Cuando hablamos de resistencia generalmente nos referiremos al primero de estos dos componentes. Éste responde a la siguiente fórmula:

$$Raw = (Patm - Palv) / \text{flujo}$$

donde *Patm* es la presión atmosférica y *Palv*, la presión alveolar. El problema es que la *Raw* no es constante durante el ciclo respiratorio, ya que ésta tiene una relación inversa con el volumen, por lo que se modifica conforme lo va haciendo el volumen pulmonar. Durante la inspiración el parénquima se distiende con objeto de generar una presión subatmosférica que permita un gradiente de presiones que haga posible la entrada de aire desde el exterior. Además, se produce una dilatación de los bronquios, por lo que en su interior el volumen aumenta, la presión disminuye y, por tanto, la *Raw* disminuye. Durante la espiración, ocurre de manera inversa y la *Raw* aumenta. Esta relación volumen-*Raw* es de tipo hiperbólico, lo que la hace más difícil de estudiar. Por este motivo, con frecuencia se utiliza un concepto complementario, la conductancia, representada por la letra *G* (*Gaw*), ya que ésta tiene una relación lineal con el volumen lo que facilita su determinación. La *Gaw* es el inverso de

la Raw ($Gaw = 1/Raw$). Por último, para comparar valores en un mismo individuo o entre distintos pacientes, se suele emplear al conductancia específica (sGaw), en la que el valor se relaciona con el volumen absoluto al cual fue medido, obteniendo valores comparables.

Determinación

Para su determinación se utiliza el pletismógrafo. Aunque su cálculo es más complejo básicamente, una vez que se conoce el flujo de la vía aérea, se estima la presión alveolar y se mide la presión en la boca, con lo que ya disponemos de todos los elementos de la ecuación.

Interpretación y aplicación clínica

La resistencia normal está entre 0,1 - 0,3 kPa · seg/L. La medición de las resistencias tiene una utilidad limitada en la práctica clínica. Su principal uso se aplica a laboratorios de investigación. En la actualidad no existe evidencia de que su uso proporcione información complementaria a otras PFR para la valoración clínica de los pacientes. Aunque entre sus posibles indicaciones figuran⁽¹²⁾ el diagnóstico o confirmación de enfermedad bronquial obstructiva, la evaluación de la respuesta a un tratamiento (p. ej., broncodilatadores) o la evaluación de la respuesta a la provocación bronquial (en la que se consideraría positivo una mejoría del 75%), es cierto que disponemos de otras PFR más sencillas que nos aportan información sobre estas indicaciones.

Debido a que la vía aérea central contribuye al 80% de la Raw, su principal aplicación, al menos teórica, sería localizar aquellas enfermedades que producen obstrucción de la vía aérea superior o central, que tienden a elevar más la Raw, que aquellas patologías que cursan con obstrucción de la vía aérea periférica. Sin embargo, por el momento, no existen suficientes datos que sustenten estas indicaciones teóricas.

ELASTICIDAD Y DISTENSIBILIDAD

Descripción

Elasticidad y distensibilidad son conceptos complementarios entre sí que registran los cambios pro-

ducidos en la presión elástica del pulmón conforme varía el volumen del mismo. Gráficamente se expresan mediante las curvas presión-volumen.

La distensibilidad, en inglés *compliance*, es la cantidad de volumen que cambia por cada unidad de cambio de presión y se expresa en ml por cm de H₂O. Por tanto, aporta información sobre la mayor o menor facilidad del pulmón para distenderse (aumentar de volumen) ante un aumento de la presión. Matemáticamente se define por la expresión: $D = \Delta V / \Delta P$.

La elasticidad es la propiedad por la que los cuerpos vuelven a su estado original al ceder la fuerza que los estaba deformando. En mecánica respiratoria la elasticidad mide los cambios de presión que se producen por cada unidad de cambio de volumen, es decir, es el inverso de la distensibilidad y mide la presión de retracción pulmonar.

Determinación

Siguiendo su expresión matemática, para medir la distensibilidad nos hace falta tener datos de la presión de retracción y del volumen. La primera se obtiene insertando un balón en el esófago, ya que la presión esofágica con flujo cero es una buena aproximación de esta presión la presión transpulmonar⁽¹²⁾.

La segunda se obtiene mediante un espirómetro.

Además, hace falta estar en condiciones de flujo cero para que las presiones que se midan sean exclusivamente las producidas por las propiedades elásticas del pulmón. Existen dos métodos para medir la distensibilidad:

- Distensibilidad dinámica. El enfermo respira a volumen corriente, siendo el principio y el final de una inspiración y espiración los puntos considerados de flujo cero para la medición.
- Distensibilidad estática. El enfermo realiza una inspiración máxima a CPT y después una espiración lenta hasta CRF, durante la cual se van produciendo oclusiones de la vía aérea a distintos intervalos de volumen para crear un flujo cero y hacer la medición.

Además, durante su realización se obtienen otros parámetros de importancia como son:

- Presión de retracción elástica. Corresponde a la presión transpulmonar (medida en esófago) en los momentos de flujo cero. Se puede medir a distintos volúmenes, pero lo habitual es medirla en inspiración máxima (CPT), con lo que expresamos el retroceso elástico máximo.
- Coeficiente de retracción. El cociente entre la elasticidad máxima y el volumen pulmonar máximo. Con ella se corrige la influencia de las variaciones de volumen que puede tener la medida de la elasticidad a CPT.

Interpretación y aplicación clínica

Por su propia definición la distensibilidad cambia con el volumen, por lo que un valor aislado aporta menos información que el estudio de la curva volumen-presión. Para obtener un valor puntual habitualmente se utiliza la distensibilidad medida a CRF, por ser la más reproducible. Los valores normales de distensibilidad pueden variar entre laboratorios, pero suelen estar entre 147-375 (media, 262) mL/cmH₂O. Se acepta que la distensibilidad normal del pulmón humano es de 200 mL/cmH₂O. Aunque su determinación nos aporta información complementaria sobre la mecánica pulmonar, a la hora de la práctica clínica apenas tiene utilidad, estando relegada por lo general al ámbito de la investigación. Su principal aplicación es en unidades de cuidados intensivos en las que pueden monitorizar estos parámetros en los pacientes intubados como marcador de mejoría tras eventos agudos principalmente restrictivos como, por ejemplo, un edema agudo de pulmón o el síndrome de distrés respiratorio agudo.

PRUEBAS DE DIFUSIÓN

Descripción

El intercambio de oxígeno y anhídrido carbónico entre la circulación pulmonar y el alvéolo es el principal objetivo del aparato respiratorio. Para su determinación se emplea el monóxido de carbono (CO) por ser una molécula con gran afinidad por la hemoglobina, que atraviesa la membrana alveolo-capilar de manera similar al oxígeno y cuyo gradiente alveolo-arterial no se modificara a lo largo

del capilar. Esta transferencia de moléculas se realiza por un proceso de difusión pasiva que está regulada por las leyes físicas de difusión de los gases expresada en la ecuación de Fick (la cantidad de gas que pasa a través de una membrana es proporcional a la superficie, a una constante de difusión y a la diferencia de presión parcial e inversamente proporcional al espesor de la membrana). Sin embargo, en nuestro caso no podemos medir la superficie ni el espesor de esta membrana en un individuo vivo, lo que nos lleva a tener que buscar una reformulación matemática de la ley aplicada a nuestro caso, apareciendo la expresión:

$$D = VCO/P_ACO$$

donde VCO es la transferencia del gas en ml/min o en moles/seg y P_ACO es la presión parcial del CO en el alvéolo en mmHg o en kPa. En otras palabras, la capacidad de difusión o difusión libre de CO (DLCO) o transferencia libre de CO (TLCO) es el volumen de CO transferido a la circulación por unidad de tiempo y por presión parcial alveolar de CO y sus resultados se pueden expresar en dos unidades: ml/min/mmHg o en mmoles/seg/kPa (Sistema Internacional).

Determinación

Para su determinación se pueden emplear numerosos métodos que se resumen en dos⁽⁹⁾:

- Métodos de respiración única. Es la técnica más utilizada. Tras varias respiraciones a volumen corriente, el paciente realiza una inspiración única de una mezcla diluida de 0,3% CO, 10% He y aire ambiente (nitrógeno y oxígeno) y contiene la respiración durante 10 segundos. Al espirar se mide la concentración de CO en el aire espirado, de esta manera se mide la velocidad con que el CO desaparece. Además, con la mezcla de He se calcula el volumen alveolar mediante la técnica de dilución de gases (véase más arriba). Su problema es que pacientes muy disneicos no pueden hacer el tiempo de apnea y en pacientes con volumen espiratorio muy reducido puede no ser fácil recoger el volumen espirado. Una variación de esta técnica es el método de la respiración lenta. El paciente hace una inspiración profunda a CPT

y, tras una breve apnea de 1-2 segundos, hace una espiración lenta a un flujo más o menos constante. La DLCO es calculada durante la espiración en varios puntos. Su principal problema es que requiere equipos de análisis de gases muy rápidos que hagan mediciones en tiempo real.

- Métodos de respiraciones múltiples. Están reservados para pacientes que no pueden hacer los 10 segundos de apnea o que no colaboran bien como los niños. Existen dos, el método del estado constante (más usado) y el de reinhalación. En el primero, el paciente respira una baja concentración de CO, sobre el 0,1%, durante medio minuto aproximadamente, midiendo el CO espirado hasta alcanzar un estado constante. En este momento se mide la transferencia de CO y la $P_{A}CO$. Sus principales inconvenientes son que tiene una baja reproducibilidad y que el resultado depende del volumen minuto.

En el método de reinhalación el paciente respira durante 30 segundos de una bolsa cerrada con una concentración baja de CO y He, reinhalando su contenido, normalmente a volumen corriente elevado y sobre 30 respiraciones por minuto. La DLCO se calcula a partir de las concentraciones iniciales y finales de CO de manera similar a la respiración única. Al igual que en el estado estable, su resultado también se influye por el patrón respiratorio. Su ventaja es que puede determinar la DLCO en pacientes con volúmenes muy bajos.

Interpretación

Al ser las propiedades físico-químicas del CO diferentes de las del oxígeno, no pueden aplicarse conclusiones sobre la difusión del oxígeno al conocer la del CO. Por tanto, la prueba lo que nos proporciona es información sobre la superficie vascular disponible para el intercambio, es decir, aquellos capilares en contacto con alvéolos ventilados⁽¹⁰⁾.

El resultado se expresa en valor absoluto y como porcentaje de su valor de referencia. A la hora de interpretar los resultados, se debe tener en cuenta que éstos pueden cambiar según las siguientes variables:

- Factor de difusión de la membrana alveolo-capilar. Los cambios en la membrana pueden hacer que el CO se transfiera más o menos.
- Alteraciones en el volumen capilar pulmonar. Al disminuir el volumen de capilares también lo hace la transferencia de CO. Esto ocurre en la anemia o en la destrucción del parénquima. Igualmente, la DLCO aumenta al crecer el volumen capilar; por ejemplo, en la poliglobulia, el sangrado intraalveolar y con el aumento de la presión hidrostática capilar pulmonar.
- Alteraciones en la tasa de combinación del gas con la hemoglobina. Situaciones como la anemia, el tabaquismo o el aumento de la presión parcial de oxígeno inspirado producen una disminución de la combinación del CO con la hemoglobina.

Por estos motivos para interpretarlo correctamente, al resultado inicial de la prueba habrá que hacerle correcciones por el volumen alveolar y por la hemoglobina del sujeto con objeto de evitar estas alteraciones. De esta manera, obtenemos los siguientes parámetros:

- DLCO/SB a la capacidad de transferencia de CO por el método de la respiración única (*single-breath*). Su valor normal en reposo es de 25 ml/min/mmHg.
- DLCO/VA o cociente de Krogh (KCO). Se corrige por el volumen alveolar (VA), por lo que a la unidad de medida se le añaden los litros de VA, quedando expresada en ml/min/mmHg/L.

Con todas estas consideraciones, podremos establecer un valor de la DLCO y el grado de alteración en la misma (se considera normal un valor > 80%, alteración leve entre 80 y 60%, alteración moderada entre 60 y 40% y alteración severa cuando es < 40%).

Aplicación clínica

Las indicaciones para la utilización de la DLCO en clínica son las siguientes:

- EPOC. Puede ser útil en la detección precoz de la enfermedad así como para valorar el componente de enfisema, que reduce la DLCO, por lo que ayuda a diferenciar el enfisema de otras enfermedades obstructivas.

- Patología intersticial. Se utiliza para la valoración inicial y el seguimiento, aunque no se ha demostrado que sea un factor pronóstico. Aunque la prueba es muy sensible y sirve como marcador temprano, no sirve para diferenciar entre distintas patologías intersticiales.
- Estudio de patrones restrictivos. Al calcular la KCO es útil para diferenciar la patología intersticial de otras restricciones como alteraciones pleurales de la caja torácica o neuromusculares, ya que en la afectación de la caja torácica la difusión se corrige al modificar el volumen alveolar, mientras que en la patología intersticial no lo hace.
- Hemorragias pulmonares. Es también útil para detectar hemorragias pulmonares que aumentan la DLCO.
- Estudio preoperatorio. Se emplea antes de la cirugía de resección pulmonar, para valorar la operabilidad, y también para valoración prequirúrgica de cualquier otra cirugía mayor.

FUNCIÓN MUSCULAR RESPIRATORIA

Presiones musculares

Descripción

El aparato respiratorio cuenta con una serie de músculos para realizar de forma correcta la inspiración y la espiración. Durante la respiración normal la inspiración se realiza por la contracción de los músculos inspiratorios, mientras que la espiración es pasiva. Sin embargo, durante el ejercicio, en personas con obstrucción bronquial suele intervenir la musculatura espiratoria. Además, los músculos respiratorios intervienen en otras funciones, como la emisión de la voz o el mecanismo de la tos⁽¹⁶⁾.

Por estos motivos, su determinación es importante dentro del laboratorio de función pulmonar.

Determinación

Para su determinación se utiliza un manómetro o transductor de presión conectado a una boquilla por la que el paciente hará movimientos respiratorios máximos midiendo de esta mane-

ra la presión generada en inspiración y espiración. La boquilla dispone de una llave bidireccional que, según su posición, hace que el paciente respire del aire ambiente o del manómetro para registrar las presiones que genera. Es aconsejable hacer al menos 6 intentos y no más de 10, seleccionando las tres mejores gráficas y considerando una buena reproducibilidad si la variabilidad entre las tres gráficas es menor del 5%. Existe también la posibilidad de medir de manera específica la fuerza de la contracción del músculo diafragma mediante el registro de la presión transdiafragmática con un catéter esofágico y otro gástrico; se trata de una prueba molesta y que debe ser reservada para casos concretos en los que se sospeche que el origen de la alteración respiratoria interese ese músculo.

Interpretación y aplicaciones clínicas

Los valores se expresan en valor absoluto en cm de H₂O y como porcentaje de su valor de referencia; se considera que una Pimax superior a 80 cm de H₂O descarta en ambos géneros una afectación de la musculatura respiratoria; cifras inferiores a 50 cm de H₂O permiten sospechar la presencia de dicha afectación; cuando estas cifras son inferiores al 30% de su valor de referencia se asocian con insuficiencia respiratoria hipercápnica y por debajo del 20%, a necesidad de ventilación mecánica. Las presiones musculares se miden principalmente en: enfermedades neurológicas, programas de rehabilitación respiratoria, estudio de disnea de origen desconocido, enfermedades metabólicas, como alteraciones tiroideas y en ventilación mecánica y desconexión de respiradores.

Máxima ventilación voluntaria (MVV)

Permite determinar indirectamente la resistencia de los músculos respiratorios de forma indirecta. Se trata de una maniobra clásica, sencilla y reproducible: realizar respiraciones rápidas y forzadas, movilizándolo el máximo de aire durante 15 segundos. Se estima que una MVV igual o inferior al máximo volumen respiratorio teórico (calculado como FEV1%30) indica una reducción de la resistencia a la fatiga.

12. Ancic P. Espirometría y mecánica pulmonar. En: Ancic Cortez P, Clark THJ, eds. Enfermedades respiratorias. Utilidad del laboratorio. 2ª ed. Chile; 1989.
13. Pino García JM, García Río F. Exploración funcional. En: Villasante C, ed. Enfermedades respiratorias. Vol I. Madrid: Aula Médica; 2002. p. 119-31.
14. Horstman M, Mertens F, Stam H. Transfer factor for carbon monoxide. *Eur Respir Mon* 2005; 10 (31): 127-45.
15. Carrera Lamarca M, Muñoz Vidal A, Togoeres Solivellas B, Agustí AGN. Pruebas de función pulmonar. En: Caminero Luna JA, Fernández Fau L, eds. Manual de Neumología y Cirugía Torácica. Volumen 1. Madrid: Editores Médicos; 1998. p. 195-222.
16. Calaf N. Medición de las presiones respiratorias máximas. En: Burgos Rincón F, Casan Clará P. Manual SEPAR de procedimientos. Módulo 4. Procedimientos de evaluación de la función pulmonar II. Barcelona: Publicaciones Permanyer; 2004. p. 134-44.
17. Pellegrino R, Viegi G. "ATS/ERS task force: Standardisation on lung function testing". Interpretative strategies for lung function tests. *Eur Respir J* 2005; 26: 948-68.