

Evaluación básica de la función pulmonar en el niño colaborador

Olaia Sardón Prado^(1,2), Laura Fidalgo Marrón^(3,4), Eduardo González Pérez-Yarza^(1,2)

⁽¹⁾Sección de Neumología Infantil. Servicio de Pediatría. Hospital Universitario Donostia. San Sebastián

⁽²⁾Departamento de Pediatría. Facultad de Medicina y Enfermería. Universidad del País Vasco (UPV/EHU). San Sebastián

⁽³⁾Paediatric Department. Al Tadawi Medical Centre. Dubai

⁽⁴⁾Servicio de Pediatría. Hospital Universitario de Guadalajara. Guadalajara

Sardón Prado O, Fidalgo Marrón L, González Pérez-Yarza E.

Evaluación básica de la función pulmonar en el niño colaborador. *Protoc diagn ter pediatri*. 2017;1:31-47.



1. INTRODUCCIÓN

No hay duda de que el estudio de la función pulmonar es un aspecto básico para el diagnóstico, evaluación y seguimiento de los niños afectados de enfermedades respiratorias. Junto con los signos y síntomas clínicos, proporciona una información objetiva y precisa, de enorme ayuda para la toma de decisiones.

En Pediatría se disponen de diversas pruebas funcionales respiratorias (PFR), con sus indicaciones y limitaciones, relacionadas estas más con la edad que con otros factores. De ahí que, tradicionalmente, se hayan clasificado en pruebas en niños colaboradores y no colaboradores. De las primeras, la más básica es la espirometría forzada junto con la prueba broncodilatadora, siendo factible también el estudio mediante pletismografía corporal total y la capacidad de difusión de monóxido de carbono (D_{LCO}).

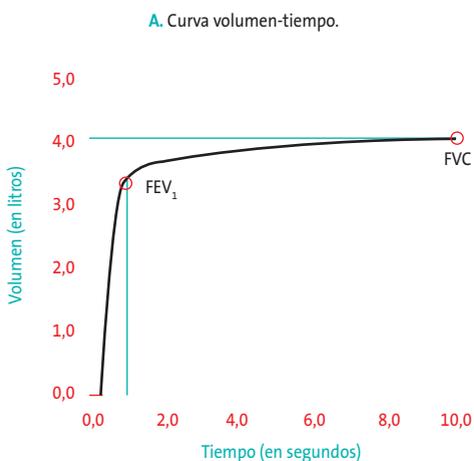
Como es obvio, la realización de todas estas pruebas requiere un equipamiento adecuado que cumpla con las normas y requisitos esta-

blecidos. Asimismo, y no menos importante, es la presencia de un equipo humano adecuadamente entrenado y adiestrado en estas técnicas, con una experiencia suficiente para obtener resultados válidos y de calidad.

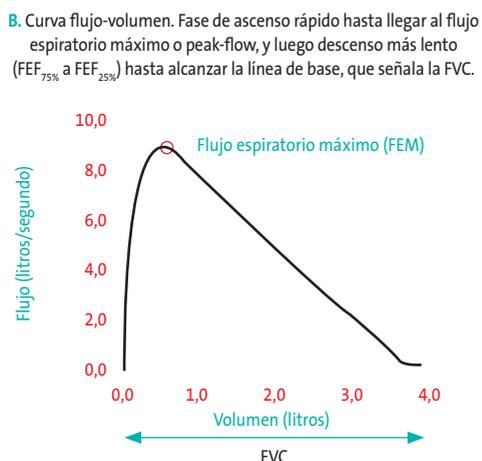
2. ESPIROMETRÍA FORZADA

Es la prueba de referencia universal. Mide volúmenes y flujos pulmonares generados en una maniobra de espiración máxima voluntaria¹. Los parámetros principales estudiados son la capacidad vital forzada (FVC), el volumen espiratorio forzado en el primer segundo (FEV_1), la relación FEV_1/FVC , el ápice de flujo espiratorio (PEF), el flujo espiratorio forzado entre el 25 y el 75% de la FVC (FEF_{25-75}) que mide la parte central de la curva flujo-volumen (mesoflujos) y los flujos espiratorios forzados al 75, 50 y 25% de la FVC (FEF_{75} , FEF_{50} y FEF_{25}) (Figura 1). Estos parámetros objetivos tienen su expresión gráfica en la curvas volumen/tiempo y flujo/volumen. Esta última permite visualizar los patrones típicos: concavidad característica del enlenteci-

Figura 1. Espirometría forzada. Estudio de volúmenes y capacidades pulmonares



FVC: capacidad vital forzada; **FEV₁:** volumen espiratorio forzado en el primer segundo.



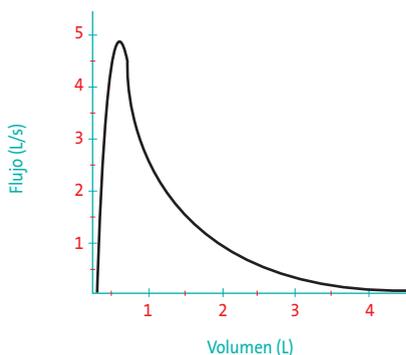
FVC: capacidad pulmonar total; **FEF:** flujos espiratorios máximos al 75, 50 y 25% de la FVC.

miento de la espiración a volúmenes bajos en los casos de obstrucción y la convexidad en los restrictivos. La curva flujo/volumen permite, además, valorar la vía aérea superior (obstrucción variable extratorácica, intratorácica o fija).

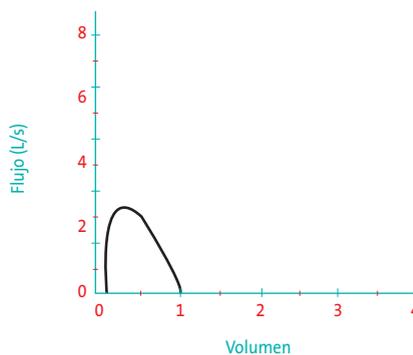
De forma genérica, se suelen considerar tres patrones funcionales respiratorios: obstructivo, restrictivo y mixto (**Figura 2**). El primero viene definido por una disminución del FEV₁ y del cociente FEV₁/FVC (< 80%) y el restrictivo

Figura 2. Estudio de la morfología de la curva flujo-volumen

A. Curva flujo-volumen. Patrón obstructivo.
Rama descendente cóncava con valores disminuidos de FEF.



B. Curva flujo-volumen. Patrón restrictivo.
Rama descendente convexa con valores de FEF normales o altos.



por la disminución de la FVC ($< 80\%$). El nivel de gravedad viene definido por distintos puntos de corte que difieren entre unas y otras normativas².

Tradicionalmente se ha planteado la realización de la espirometría forzada en niños a partir de los 6 años^{1,2}, edad a la que son capaces de colaborar y realizar maniobras que cumplan con los criterios de aceptabilidad y reproducibilidad. Es a partir del 2007, año en el que se publican las normativas y recomendaciones de la American Thoracic Society/European Respiratory Society (ATS/ERS)³, cuando se comienza a ampliar la edad de realización de esta maniobra a la franja de edad comprendida entre los 2-6 años, haciéndose especial hincapié en el tiempo de espiración forzada (FET), el FEV_1 y el $FEV_{0,5}$. El inicio de la prueba es calculado a partir del volumen extrapolado (VBE) ≤ 80 ml o $< 12,5\%$ de la FVC. En relación a la repetibilidad de las maniobras, se recomienda obtener al menos dos maniobras aceptables con una diferencia entre el FVC y $FEV_t \leq 10\%$ o $< 0,1$ l entre ellas. Se considera la mejor curva aquella con la mayor suma de FVC y $FEV_{0,5}$, de la cual se obtendrán los flujos espiratorios. El FEV_1 , $FEV_{0,5}$, $FEV_{0,75}$ y la FVC se referirán a los mejores valores obtenidos, aunque no sean de la misma curva. Por lo tanto, con unos criterios de aceptabilidad y reproducibilidad adaptados, se demuestra que es posible realizar medidas de función pulmonar objetivas y fiables³. Estudios posteriores corroboran esta afirmación y subrayan el posible papel del $FEV_{0,5}$ y $FEV_{0,75}$, sobre todo este último, como un parámetro útil y fiable en este grupo etario que podrían ser clínicamente más relevantes que el FEV_1 . Ello es debido al hecho de que los niños más pequeños tienen una vía aérea proporcionalmente más

larga en relación al volumen pulmonar en comparación con niños escolares y adultos. De esta forma, durante la maniobra espiratoria, son capaces de realizar una espiración completa en menos de un segundo^{4,5}.

En España, el estudio CANDELA demostró la factibilidad de la realización de espirometría forzada con garantías en la mayoría de los niños preescolares siguiendo los estándares internacionales^{3,6,7} y estableció, además, los valores de referencia de la población infantil comprendida entre los 2 y 7 años⁸. Recientemente se han publicado valores de referencia internacionales^{9,10}, valores de referencia *All ages equations* disponibles en <http://www.lungfunction.org/growinglungs>.

3. PRUEBA DE BRONCODILATACIÓN

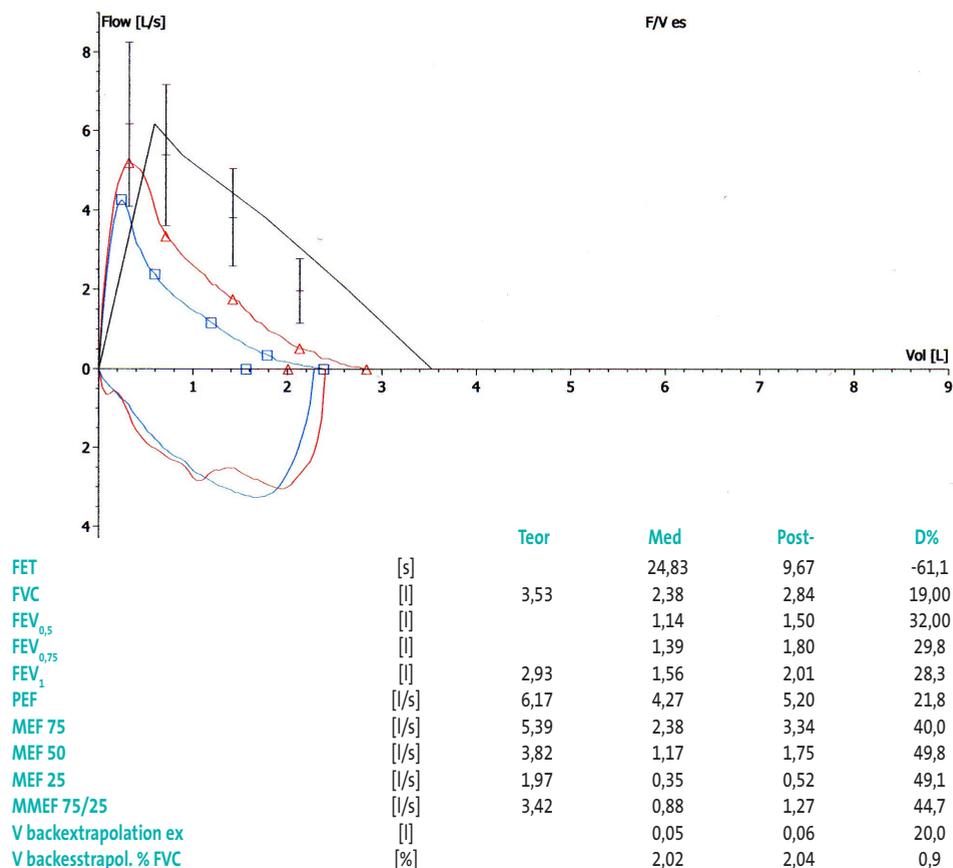
La prueba de broncodilatación (PBD) se utiliza para estudiar la reversibilidad de la obstrucción del flujo aéreo intrapulmonar. Consiste en la realización de una espirometría basal y la repetición de la misma un tiempo después de la administración de un fármaco broncodilatador. Debe constituir una exploración habitual en el estudio de la función pulmonar cualquiera que sea el ámbito asistencial en el que se realice. Tiene una enorme utilidad para el diagnóstico de asma, y debe realizarse de forma rutinaria en la primera visita, aunque los valores basales sean normales. Sin embargo, la mayoría de los niños tienen un asma intermitente o leve por lo que en muchos casos la PBD será negativa, sin que ello excluya el diagnóstico de asma. En las visitas sucesivas, aunque quizás no sea tan necesaria, algunos autores recomiendan su realización ya que se ha podido observar su relación con el pronóstico

a corto y medio plazo, así como la respuesta a corticoides inhalados¹¹.

Los protocolos y criterios de reversibilidad están bien establecidos. Para llevarla a cabo se utilizan los agonistas β_2 -adrenérgicos. El más habitual es el salbutamol, recomendándose cuatro dosis de 100 μ g separadas por interva-

los de 30 segundos (total, 400 μ g). Se debe administrar con cámara espaciadora acorde a la edad del paciente. Así, se sigue considerando como significativa una mejoría de los valores del FEV₁ de un 12% respecto al valor basal y un 9% si se relaciona con el valor teórico¹² (Figura 3). Está por determinar el punto de corte en preescolares^{13,14}.

Figura 3. Espirometría forzada. Test de broncodilatación



FET: tiempo de espiración forzada en segundos; FVC: capacidad vital forzada; FEV_{0,5}: volumen espiratorio forzado en los primeros 0,5 segundos; FEV_{0,75}: volumen espiratorio forzado en los primeros 0,75 segundos; FEV₁: volumen espiratorio forzado en el primer segundo; PEF: ápice de flujo espiratorio; FEF₂₅₋₇₅: flujo medio alcanzado en el tramo de la curva comprendido entre el 25 y el 75% de la capacidad vital forzada; MEF 75: flujo alcanzado cuando se lleva espirado un 75% de la capacidad vital forzada; MEF 50: flujo alcanzado cuando se lleva espirado un 50% de la capacidad vital forzada; MEF 25: flujo alcanzado cuando se lleva espirado un 25% de la capacidad vital forzada.

Broncodilatación positiva: incremento de FEV₁ del 28,3% respecto del basal y del 15,3% respecto del teórico.

4. PRUEBAS DE BRONCOPROVOCACIÓN INESPECÍFICA

La hiperrespuesta bronquial (HRB) es el aumento de la obstrucción de las vías aéreas en respuesta a estímulos broncoconstrictores *in vivo*. Se expone al niño a dosis crecientes de un estímulo broncoconstrictor inespecífico (estímulos físicos, químicos o farmacológicos), mientras se mide la obstrucción al flujo aéreo. Son estímulos directos los que actúan sobre los receptores del músculo liso bronquial (metacolina, histamina, carbacol) y estímulos indirectos los que actúan en células distintas a la musculatura lisa (ejercicio, adenosina)^{15,16}. Como resultado de la prueba se obtiene una curva dosis-respuesta en la que la posición mide la sensibilidad, la pendiente mide la reactividad y la meseta mide la respuesta máxima. La prueba directa más ampliamente utilizado es el test de metacolina.

Cada una de las pruebas (metacolina, manitol, ejercicio, etc.) puede tener su indicación y utilidad. Una de indicaciones más frecuentes es la confirmación diagnóstica en casos de sospecha de asma, cuando cursan con síntomas atípicos y tienen una espirometría y prueba de broncodilatación normales^{17,18}. No se utilizan para la valoración de la gravedad de la enfermedad ni para monitorizar el tratamiento.

4.1. Pruebas de esfuerzo

La actividad física constituye un aspecto fundamental de la vida diaria durante la infancia. Durante el ejercicio se producen modificaciones en todo el organismo para hacer frente al aumento de la demanda metabólica que tiene lugar en los músculos al contraerse. La tole-

rancia individual al ejercicio constituye un parámetro clínico importante que refleja el funcionamiento de los sistemas implicados y que podemos observar a través de las pruebas de esfuerzo. El hecho de que no sean invasivas, de su aplicabilidad clínica y de que aportan información que no puede obtenerse a través de las pruebas de función pulmonar en reposo, apoya su inclusión en los servicios de Neumología Pediátrica^{19,20}.

Se distinguen diferentes pruebas de esfuerzo en función del criterio utilizado para su clasificación. Según la intensidad del esfuerzo, pueden ser pruebas máximas o submáximas; según el protocolo del esfuerzo, de carga constante o incrementales; según las variables estudiadas se distinguen las pruebas de esfuerzo cardiopulmonar (PECP) o ergoespirometrías y las pruebas simples de esfuerzo o pruebas de campo²¹.

En función del equipamiento disponible y de la finalidad con la que se realice la prueba, se elegirá una modalidad u otra, el tipo de protocolo y las variables que debe incluir. Con un protocolo y un equipo apropiado se pueden llevar a cabo en la mayoría de niños en edad escolar²².

4.1.1. Prueba de broncoprovocación inducida por ejercicio

El ejercicio físico es uno de los estímulos no farmacológicos que pueden producir broncoconstricción, siendo uno de los estímulos más frecuentes a la hora de provocar exacerbaciones agudas en pacientes asmáticos. Esta obstrucción transitoria al flujo de aire en las vías respiratorias se denomina broncoespasmo inducido por ejercicio (BIE).

La prueba de broncoprovocación inducida por ejercicio puede realizarse mediante carrera libre, bicicleta ergométrica o tapiz rodante.

El paciente deberá inhalar aire con una humedad ambiental menor del 50% y una temperatura menor de 25 °C, utilizando unas pinzas nasales para conseguir una respiración bucal. El ejercicio debe durar de 6 a 8 minutos (hasta 6 minutos en menores de 12 años) y debe tener un inicio y una finalización rápidos. Para la monitorización de la intensidad del ejercicio en niños puede utilizarse la frecuencia cardiaca, manteniendo una frecuencia cardiaca entre el 80 y el 90% de la máxima teórica (200-edad en años) durante los 4 o 6 últimos minutos^{23,24}.

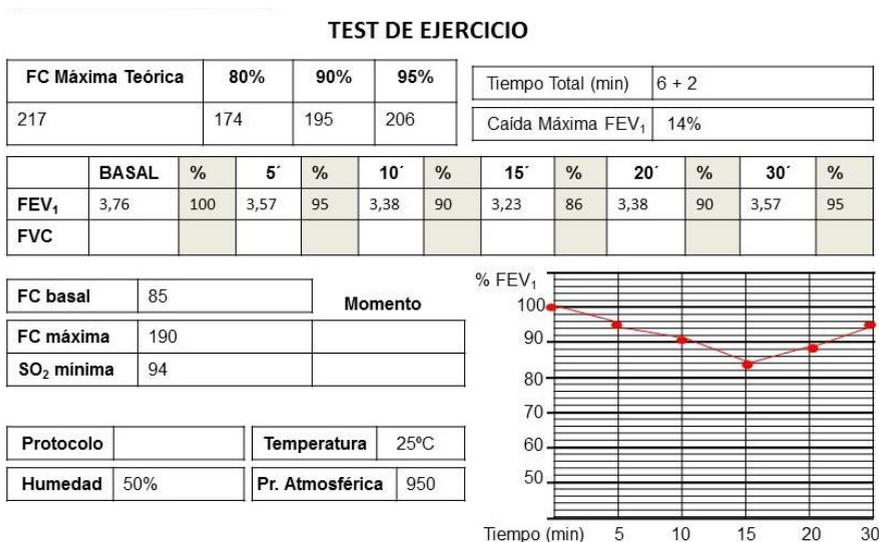
Se debe realizar una espirometría de referencia antes del ejercicio y repetirla a los 5, 10, 15, 20 y 30 minutos de su finalización. El resulta-

do se expresa mediante una curva tiempo-respuesta, siendo la respuesta el porcentaje de caída del FEV₁ respecto al valor previo al ejercicio. Se considera que la prueba es positiva cuando el FEV₁ disminuye más del 10% con respecto al basal (Figura 4).

4.1.2. Pruebas de esfuerzo cardiopulmonar (PECP)

La ergoespirometría es la prueba de referencia para conocer la repuesta del organismo al ejercicio. Consiste en la medición de los gases respirados mientras se realiza una actividad física controlada. Los órganos y sistemas implicados en el transporte de oxígeno van aumentando su función, mientras se miden variables como el consumo de oxígeno, la producción de dióxido de carbono, la ventilación minuto, el cociente respiratorio, el regis-

Figura 4. Hoja de resultado de la prueba de broncoespasmo inducido por ejercicio



Ejemplo de resultado positivo de un test de broncoespasmo inducido por ejercicio. Obsérvese la caída del 14% del FEV₁ a los 15 minutos de finalizar el ejercicio.

Figura 5. Detalle de ergoespirometría



Medición de gases respirados mientras se realiza prueba de esfuerzo en tapiz rodante con registro electrocardiográfico.

tro electrocardiográfico, la medida de la tensión arterial, la oximetría... obteniéndose información sobre los factores que limitan el ejercicio y sobre la respuesta del organismo a diferentes intensidades de esfuerzo (Figura 5).

Además de evaluar la tolerancia al ejercicio, están indicadas para estudiar los efectos de intervenciones terapéuticas (entrenamiento, oxígeno, fármacos), la idoneidad previa a determinados tratamientos (trasplantes, quimioterapia), estudiar reacciones adversas al ejercicio o confirmar su seguridad, elaborar protocolos de entrenamiento ajustados a la capacidad funcional en niños con enfermedades crónicas.

4.1.3. Pruebas simples de esfuerzo

Son pruebas con menos requerimientos tecnológicos, lo que las hace más practicables

fuera del laboratorio de función pulmonar y en las que las variables obtenidas son más limitadas. Destacamos el test de la marcha de 6 minutos como prueba de esfuerzo mantenido y submáximo y el test de la lanzadera como prueba de esfuerzo incremental y máximo, cada uno con diferentes aplicaciones clínicas²¹.

Test de la marcha de 6 minutos (6MWT). Es la prueba de campo con mayor difusión y más estudiada, desde su estandarización por la ATS en el año 2002²⁵. Evalúa la capacidad para realizar ejercicio, midiendo la distancia caminada en terreno llano a lo largo de un pasillo de 30 metros, al ritmo que marca el paciente, intentando recorrer la mayor distancia posible en 6 minutos. La variable principal es la distancia caminada, pero también se miden variables que nos informan sobre la respuesta del organismo al ejercicio: frecuencia cardiaca, saturación transcutánea de oxígeno, tensión arterial basal, disnea y sensación de esfuerzo percibido.

Se utiliza para observar la aparición de disnea y desaturaciones de oxígeno que presentan los niños enfermos al realizar actividades físicas habituales, seguimientos de la tolerancia al ejercicio, cuantificar el efecto de una intervención terapéutica, etc.

Disponemos de dos ecuaciones predictivas para nuestra población infantil, con edades comprendidas entre los 6 y 14 años, en función de si se utiliza la prueba en una determinación aislada o de forma evolutiva en un mismo paciente (ya que nuestro grupo si ha evidenciado un efecto aprendizaje que mejora el resultado al repetir la prueba hasta una tercera vez)²⁶.

Ecuación predictiva una determinación (explica un 43% de la variabilidad):

$$6MWD \text{ (metros)} = 376,98 + 9,95 \times \text{edad (años)} + 1,92 \times \text{talla(cm)} - 5,01 \times \text{IMC (kg} \times \text{m}^{-1}\text{)},$$

Límite inferior de la normalidad (LIN): restan- do 94,46 metros al resultado obtenido.

Ecuación predictiva varias determinaciones (explica un 40% de la variabilidad):

$$6MWD \text{ (metros)} = 427,43 + 12,16 \times \text{edad (años)} - 8,69 \times \text{IMC (kg} \times \text{m}^{-1}\text{)} + 2,01 \times \text{talla(cm)},$$

Límite inferior de la normalidad (LIN): restan- do 100,50 metros al resultado obtenido.

En la página de la Sociedad Española de Neu- mología Pediátrica está disponible una aplica- ción para su cálculo automatizado ([http:// www.neumoped.org/utilidades.htm](http://www.neumoped.org/utilidades.htm)).

4.2. Pletismografía

La pletismografía corporal total mide diversos volúmenes de gas, como el volumen residual (RV), la capacidad residual funcional (FRC) y la capacidad pulmonar total (TLC). Además, cuantifica la resistencia total ($R_{aw_{TOT}}$), la resis- tencia específica de la vía aérea ($sRaw$), la con- ductancia (Gaw) y la conductancia específica ($sGaw$)^{27,28}. La resistencia se define como la relación entre el flujo de aire a través de las vías respiratorias y la presión que se necesita ejercer para producir ese flujo. La resistencia total ($R_{aw_{TOT}}$) incluye la resistencia de la pared torácica, la del tejido pulmonar y la de la vía aérea. La resistencia específica ($sRaw$) es el producto de la resistencia en las vías aéreas por la FRC (Figura 6). Con el crecimiento y el

desarrollo las resistencias disminuyen y los vo- lúmenes pulmonares aumentan; sin embargo, la resistencia específica se mantiene relativa- mente estable y varía poco con la edad, la talla y el sexo. Se trata, por tanto, de un parámetro sensible y reproducible para discriminar entre la normalidad y la enfermedad, y también en- tre patologías con clínica similar facilitando además la interpretación longitudinal de las medidas obtenidas en un mismo individuo a lo largo del tiempo²⁹⁻³². Recientemente, se han publicado valores de referencia de la $sRaw$ en niños entre 2 y 10 años³³.

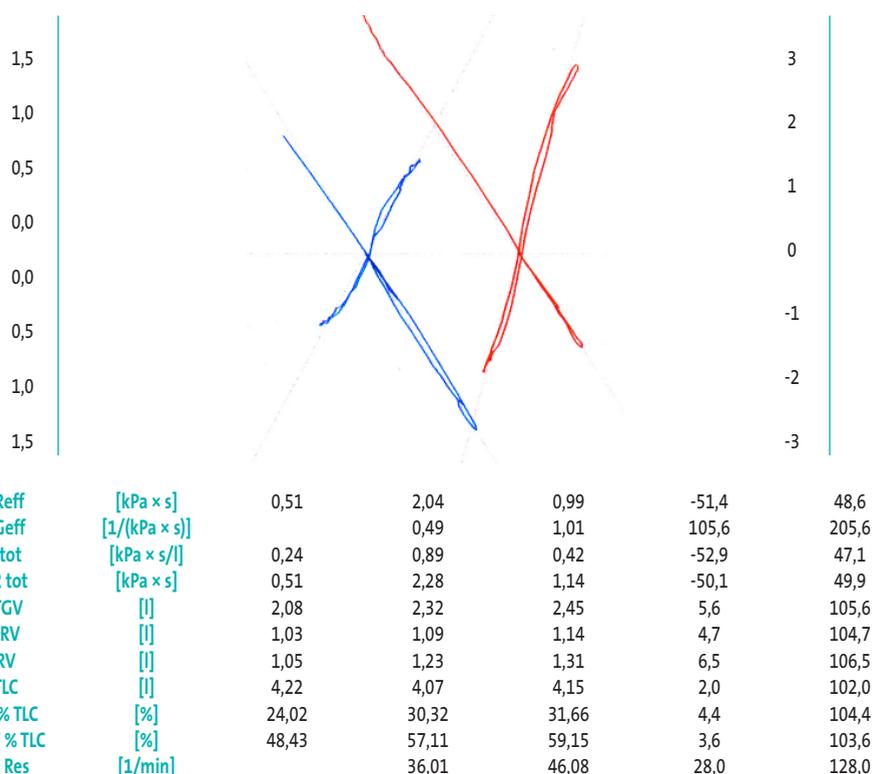
Es una técnica compleja que requiere introdu- cir al niño sentado en una cabina hermética- mente cerrada y hacer que respire a través de una boquilla rígida y de un neumotacógrafo. Cuando el paciente está cerca de la FRC, se cie- rra el ocluser al final de una espiración duran- te 2-3 segundos y se pide al paciente que rea- lice respiraciones rápidas tipo jadeo (son necesarias 3-5 maniobras válidas). Posterior- mente se abre el ocluser y el paciente expulsa el aire hasta alcanzar el RV. Finalmente, el pa- ciente debe realizar una maniobra de capaci- dad inspiratoria lenta²².

Dado que su determinación utiliza el flujo ins- piratorio y espiratorio, la gráfica flujo-presión permite calcular la resistencia inspiratoria y es- piratoria que en sujetos sanos es igual, pero que en casos de obstrucción pueden ser dife- rentes. Asimismo, la morfología de la curva pro- porciona información sobre la localización de la obstrucción. Si la obstrucción es fundamen- talmente espiratoria, la curva adopta la forma de un “palo de golf”. La morfología en “S itálica” indica obstrucción difusa leve; el aumento de la resistencia inspiratoria sugiere obstrucción ex- tratorácica; el aumento de la resistencia espira-

toria sugiere enfermedad obstructiva pulmonar crónica, y el aumento marcado de ambas resistencias es sugestivo de obstrucción traqueal. En patología obstructiva generalizada de la vía aérea, se constata un aumento de la sRaw, de la FRC, del RV y de la TLC, con disminución del volumen corriente (VC). Sin embargo, en patologías restrictivas, patología pleural, malformaciones e hipotonía de la musculatura respiratoria, la TLC está disminuida. En las alteraciones mixtas puede existir poca alteración de la TLC y, por tanto, es útil la medida de la difusión del monóxido de carbono.

La pletismografía es capaz de cuantificar la respuesta al tratamiento broncodilatador con una sensibilidad del 66%, una especificidad del 81% y un valor predictivo positivo del 84% para un punto de corte del 25% de disminución en la sRaw en la prueba de broncodilatación (Figura 6). Asimismo, se considera a la sGaw una variable muy sensible a los cambios de calibre de la vía aérea y se ha establecido un incremento del 40-55% como punto de corte para valorar una respuesta como positiva^{1,22,34}.

Figura 6. Pletismografía. Prueba broncodilatadora



sReff: resistencia específica de la vía aérea; sGeff: conductancia específica de la vía aérea; Rtot: resistencia total de la vía aérea; ITGV: volumen de gas intratorácico; ERV: volumen de reserva espiratorio; RV: volumen residual; TLC: capacidad pulmonar total; BF Res: frecuencia respiratoria; kPa/s: kilopascales por segundo; l: litro; 1/min: respiraciones por minuto.

4.3. Difusión pulmonar

La medición de la difusión informa sobre la transferencia del gas entre el alveolo y la sangre de los capilares pulmonares. El gas universalmente utilizado es el monóxido de carbono (CO) debido a que es soluble en sangre y a su gran afinidad por la hemoglobina, lo que permite utilizar concentraciones muy bajas. La capacidad de difusión de CO (D_{LCO}) es la cantidad de dicho gas captada por minuto en relación con el gradiente de CO a través de la interfase alveolo capilar y en la sangre capilar.

Existen diferentes métodos para medir la D_{LCO} : la técnica de reinhalación (*rebreathing*), la técnica de respiraciones múltiples y el método de la respiración única (*single breath*)³⁵. Este último es el más utilizado actualmente.

Está indicada su realización en la evaluación y el seguimiento de enfermedades que afectan al parénquima pulmonar, relacionadas con fármacos (metotrexato, nitrofurantoína, azatioprina, penicilamina y ciclofosfamida), con la quimioterapia y radioterapia, en el seguimiento y evaluación de la bronquiolitis obliterante, de la fibrosis pulmonar, de la hemorragia pulmonar y en la valoración de la afectación pulmonar en enfermedades sistémicas, entre otras.

El paciente respira a través de un neumotacógrafo que va a medir el volumen de aire inspirado y que está conectado a una válvula con tres vías, que permite que el paciente respire inicialmente del ambiente²⁸. La medición de D_{LCO} por respiración única consiste en hacer que el paciente exhale hasta alcanzar el RV y posteriormente realiza inspiración rápida hasta TLC. La duración de la inspiración oscilará entre 1,5 y 2 segundos en individuos sanos y

será inferior a 4 segundos en pacientes con obstrucción de la vía aérea. El volumen inspiratorio debe ser por lo menos el 90% de la mayor CV previa (debe hacerse espirometría forzada previa) de un gas que contenga CO al 0,3%, helio (He) al 10%, oxígeno al 21% y el nitrógeno en equilibrio. Posteriormente el paciente realizará una apnea de 10 segundos y a continuación exhalará el aire rápidamente. Se rechaza la primera parte, equivalente al espacio muerto que no ha sufrido el proceso de difusión (750-1000 ml) y se utiliza la segunda fracción (fracción alveolar) donde se determina la concentración final de helio y CO. La prueba debe repetirse hasta lograr al menos dos valores que tengan una variabilidad menor del 10%.

Se produce un aumento de D_{LCO} en patologías con aumento de volumen sanguíneo en los capilares pulmonares, como son la policitemia, la hemorragia pulmonar, los cortocircuitos izquierda-derecha, el ejercicio o en ciertos asmáticos que generan presiones negativas intratorácicas durante la inspiración hasta TLC³⁶.

Existe una disminución de D_{LCO} en los pacientes con reducción del volumen alveolar o en los defectos de difusión como en la bronquiolitis obliterante, en la que se produce una pérdida de superficie de la interfase alveolo-capilar, secundaria a la rotura alveolar y aparición de espacios alveolares grandes²⁸. También se encuentra disminuida en patología con menor llegada de volumen de sangre a dicha interfase (anemia, embolia pulmonar e insuficiencia cardíaca), en la alteración estructural de la interfase (fibrosis intersticial, sarcoidosis, colagenosis, asbestosis, alveolitis extrínseca, edema pulmonar y fases avanzadas de la fibrosis quística) y en la hipertensión pulmonar primaria.

4.4. Resistencias oscilatorias. Oscilometría de impulsos (IOS)

La técnica de oscilación forzada (FOT) permite evaluar la resistencia mecánica del sistema respiratorio (Rrs) de forma no invasiva durante la respiración espontánea. Tiene especial relevancia en pacientes con escaso grado de colaboración, ya que solo exige que el paciente respire a volumen corriente a través de una pieza bucal o de una mascarilla, sin tener que realizar ningún esfuerzo³⁷.

Se utiliza un generador externo de presión que se aplica en la boca del paciente y se miden los cambios de flujo que este genera en la vía aérea. En el caso de la IOS (una modalidad de la técnica de la oscilación forzada) se aplica una oscilación de presión de pequeña amplitud en la entrada de la vía aérea y esto permite la determinación de la impedancia del sistema respiratorio (Zrs) que mide la oposición del sistema respiratorio al paso del aire y tiene dos componentes: la resistencia real (Rrs) y la reactancia imaginaria (Xrs)³. La resistencia depende fundamentalmente del calibre de las vías aéreas centrales, mientras que la reactancia viene determinada principalmente por las propiedades elásticas e inerciales de las vías aéreas, tejido pulmonar y tórax.

La oscilación de presión se genera mediante un altavoz convencional acoplado a una cámara. El movimiento del cono del altavoz es provocado por una señal sinusoidal generada por el microordenador. La señal de presión en la boca se registra con un transductor de presión, y la señal de flujo se obtiene mediante un transductor de presión diferencial acoplado al neumotacógrafo. Ambas señales se acondicionan, se filtran y se introducen en el ordenador

para el cálculo de la Zrs. La señal que recoge el neumotacógrafo está compuesta por la que provoca la respiración espontánea del paciente y la que provoca los impulsos del altavoz. Normalmente la resistencia va disminuyendo con la frecuencia mientras que la reactancia va aumentando³⁸.

El niño deberá permanecer sentado, cómodamente, con una pinza en la nariz, respirando a través de una boquilla rígida y sujetando ambas mejillas. En los niños más pequeños se utiliza una mascarilla con una pieza bucal en su interior. El paciente respirará a volumen corriente y cuando la respiración es estable se comienza la medición, que durará entre 30-60 segundos. Los impulsos se suceden cada 0,2 segundos, utilizándose unos 150 para el cálculo. El valor que se refleja es el valor medio para cada frecuencia de todos los impulsos³⁰.

Mientras que la presión y el flujo se miden en el dominio temporal, el cálculo de las impedancias se efectúa en el dominio frecuencial. La señal de impulso generada por un altavoz contiene innumerables frecuencias. Para el estudio de la oscilometría de impulsos, el rango de frecuencias más útil es el de 5 y 35 Hz. La frecuencia que produce la respiración espontánea está entre 0,2 y 5 Hz. El análisis de la resistencia y de la reactancia en el espectro de frecuencias puede ayudar a determinar si el aumento de resistencias es producido en las vías centrales o en las distales. Las primeras se comportan funcionalmente como segmentos fijos, no distensibles, mientras que las periféricas están formadas por segmentos bronquiales distensibles (**Figura 7**). Se han publicado valores de referencia por distintos autores^{39,40} siendo la talla la variable que mejor se relaciona con los valores obtenidos. La resistencia a

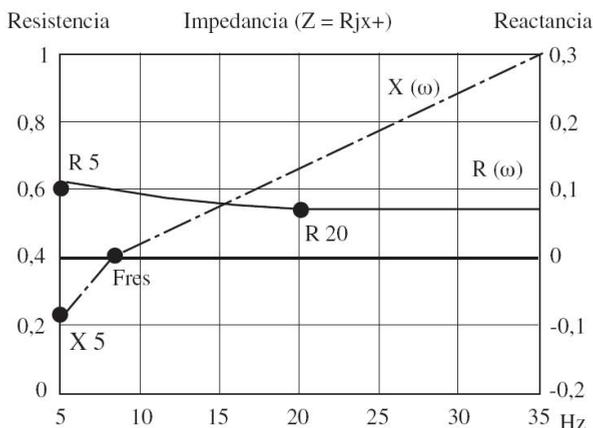
las diversas frecuencias disminuye con la talla y la edad mientras que la reactancia aumenta.

Se considera que la R5 está aumentada cuando es mayor de 150% de su valor teórico, lo que sería equivalente a una disminución de un 20% en el FEV₁ y un aumento del 50% de la sRaw³¹. Cuando el patrón de obstrucción es solo de la vía aérea central o proximal, el aumento de Rrs es independiente de la frecuencia de oscilación. En situaciones en que el patrón de obstrucción implica a la vía aérea distal o periférica, la Rrs aumenta a bajas frecuencias de oscilación y disminuye a altas frecuencias de oscilación (R20). Esto se explica a causa de la redistribución no homogénea del gas intrapulmonar o cambios en las propiedades de reactividad elástica de la vía aérea periférica. Este fenómeno se conoce como dependencia de las frecuencias. En los niños preescolares sanos es normal que las resistencias sean dependientes de las frecuencias. Este aumento de la dependencia frecuencial

podría estar en relación con artefactos de la vía aérea superior. Por tanto, a frecuencias bajas (5Hz) el valor más reproducible es la R, mientras que a frecuencias altas sería la X.

La IOS ha demostrado su utilidad en el diagnóstico de asma⁴¹⁻⁴³, habiendo aumentado en los últimos años el interés de esta técnica como herramienta para evaluar la pequeña vía aérea^{44,45}. A largo plazo, pudiera ser útil en la evaluación funcional en preescolares asmáticos⁴⁶ e incluso, como se ha visto recientemente, para tratar de discriminar el grado de control del asma⁴⁷. La resistencia a 5 Hz (R5) reflejaría la resistencia total, obstrucción tanto a nivel proximal como distal, la R20 solo la resistencia central o proximal y la diferencia (índice) entre R5 y R20 sería expresión de la resistencia en la pequeña vía aérea únicamente⁴⁸. La reactancia distal, X5 refleja también cambios en el grado de obstrucción de la vía distal (Figura 7)⁴⁹. Asimismo, se ha descrito su utilidad en la evaluación de la respuesta broncodilatadora⁴¹, mos-

Figura 7. Oscilometría de impulsos. Principales parámetros



La impedancia respiratoria consiste en un espectro de resistencias y reactancias. Los parámetros más importantes son R5 (resistencia a 5 Hz), R20 (resistencia a 20), X5 (reactancia a 5 Hz) y Fres (frecuencia de resonancia: la frecuencia a la que la reactancia es cero)³⁷.

trando la R5 una buena reproductibilidad y correlación con los resultados aportados por la espirometría y la pletismografía⁵⁰. También se ha descrito como técnica para evaluar la hiperreactividad bronquial³⁰. Un incremento del 50% respecto al valor basal en R5 tendría una sensibilidad de 0,63 y una especificidad de 0,89 para detectar una caída del 15% del FEV₁⁵¹.

4.5. Resistencias por interrupción

La medida de la resistencia mediante interrupción (Rint) cuantifica la resistencia total del sistema respiratorio. Requiere una mínima colaboración y se realiza a volumen corriente. Se fundamenta en la medida de la presión en la boca (Pmo) del paciente inmediatamente después de la breve interrupción producida por un obturador asumiendo que, tras esta interrupción, la vía aérea está abierta y la presión en la boca es equivalente a la presión alveolar, y la medida del flujo (V') inmediatamente antes de la oclusión. Así pues:

$$Rint = Pmo / V'^{52}.$$

Se trata de una técnica sencilla, aunque está limitada al hecho de que depende del rápido equilibrio entre la presión en la boca y la presión alveolar, y en las enfermedades obstructivas, este equilibrio no es rápido y la Rint suele subestimarse. Existen unas normas consensuadas para la medición de las propiedades mecánicas del sistema respiratorio mediante las técnicas de oclusión ya que existen diferencias que pueden ser importantes según cuál sea el método empleado para medir la presión en la boca y el momento de la interrupción durante el ciclo respiratorio³. Uno de los más utilizados actualmente es el de la extrapolación posterior lineal.

Esta técnica requiere la utilización de un neumotacógrafo y de un colusor (*shutter*). El paciente debe respirar a volumen corriente, en posición sentado respirando a través de una pieza bucal con pinza nasal³. Cuando la respiración se estabiliza, se realiza una oclusión rápida y completa del neumotacógrafo durante 100 milisegundos y posteriormente se abre. Generalmente, deben recogerse unas diez oclusiones para obtener al menos cinco maniobras aceptables. La resistencia se calcula dividiendo la presión en la boca durante la oclusión por el flujo inmediatamente anterior a la oclusión. Al inicio de la oclusión se produce un aumento rápido de la presión en la boca con marcadas oscilaciones de la presión, posteriormente la presión se estabiliza y la señal es más lineal.

Recientemente se han publicado valores de referencia en niños sanos entre 3 y 13 años, siendo la altura el mejor predictor de la Rint en niños⁵³. Sin embargo, la gran variabilidad interindividual³ de esta técnica hace que sea difícil establecer un punto de corte para clasificar un niño como obstructivo y por tanto, su aplicación en el asma es actualmente incierta⁵⁴. Sin embargo, se ha descrito la capacidad de esta técnica para cuantificar la respuesta broncodilatadora en preescolares sanos y asmáticos y se ha considerado una respuesta positiva cuando la caída de las resistencias es de un 35%⁵⁵. En este sentido la determinación de una respuesta broncodilatadora mediante la Rint ha demostrado tener buena correlación con la HRB medida por el test de metacolina en preescolares con tos crónica⁵⁶. Asimismo, algunos autores han demostrado la utilidad de la Rint para cuantificar la HRB en preescolares asmáticos, aunque su sensibilidad fue inferior que la mostrada por la pletismografía^{57,3}.

5. CONCLUSIÓN

En conclusión, podemos afirmar que existen numerosas técnicas válidas y fiables que pueden realizarse para determinar la función pulmonar en el niño colaborador. La elección de las mismas dependerá principalmente de los recursos disponibles en cada unidad y de la experiencia del personal cualificado en cada servicio.

La espirometría forzada es la prueba fundamental que permite diagnosticar, evaluar y realizar el seguimiento de la mayoría de los niños afectados de enfermedades respiratorias y debe realizarse de forma rutinaria en la práctica clínica diaria. Es capaz de aportar información objetiva y precisa que permite y facilita la toma de decisiones. Existen valores de referencia internacionales y los resultados obtenidos deben expresarse en valores absolutos y en *z-score*.

BIBLIOGRAFÍA

1. Miller MR, Hankinson J, Brusasco V, Burgos F, Casaburi R, Coates A, *et al*. Standardisation of spirometry. *Eur Respir J*. 2005;26:319-38.
2. Pellegrino R, Viegi G, Brusasco V, Crapo RO, Burgos F, Casaburi R, *et al*. Interpretative strategies for lung function tests. *Eur Respir J*. 2005;26:948-68.
3. Beydon N, Davis SD, Lombardi E, Allen JL, Arets HGM, Aurora P, *et al*. An official American Thoracic Society/European Respiratory Society statement: pulmonary function testing in preschool children. *Am J Crit Care Med*. 2007;175:1304-45.
4. Pesant C, Santschi M, Praud JP, Geoffroy M, Niyosenga T, Vlachos-Mayer H. Spirometric pulmonary function in 3-to 5-year old children. *Pediatr Pulmonol*. 2007;42:263-71.
5. Loeb JS, Blower WC, Feldstein JF, Koch BA, Munlin AL, Hardie WD. Acceptability and repeatability of spirometry in children using updated ATS/ERS criteria. *Pediatr Pulmonol*. 2008;43:1020-4.
6. Santos N, Almeida I, Couto M, Morais-Almeida M, Borrego LM. Feasibility of routine respiratory function testing in preschool children. *Rev Port Pneumol*. 2013;19:38-41.
7. Neves Veras T, Araujo Pinto L. Feasibility of spirometry in preschool children. *J Bras Pneumol*. 2011;37:69-74.
8. Pérez-Yarza EG, Villa JR, Cobos N, Navarro M, Salcedo A, Martín C. Espirometría forzada en preescolares sanos bajo las recomendaciones de la ATS/ERS: estudio CANDELA. *An Pediatr (Barc)*. 2009;70:3-11.
9. Stanojevic S, Wade A, Stocks J, Hankinson J, Coates AL, Pan H, *et al*. Reference ranges for spirometry across all ages: a new approach. *Am J Respir Crit Care Med*. 2008;177:253-60.
10. Quanjer PH, Stanojevic S, Cole TJ, Baur X, Hall GL, Culver BH, *et al*. Multi-ethnic reference values for spirometry for the 3-95-yr age range: the global lung function 2012 equations. *Eur Respir J*. 2012;40:1324-43.

11. Galant SP, Morphey T, Amaro S, Liao O. Characteristics of the bronchodilator response in controller naïve asthmatic children. *J Pediatr*. 2007;151:457-62.
12. Korta Murua J. Prueba de broncodilatación. Función pulmonar en el niño. Principios y aplicaciones. Madrid. Ergon; 2007. p. 63-8.
13. Sardón O, Pérez-Yarza EG, Corcuera P, Aldasoro A, Korta J, Mintegui J, *et al*. Prueba de broncodilatación en preescolares: concordancia entre el FEV₁, FEV_{0,5} y FEV_{0,75}. Comunicación oral. XXXII Reunión de la Sociedad Española de Neumología Pediátrica. Andorra, mayo de 2010.
14. Borrego LM, Stocks J, Almeida I, Stanojevic S, Antunes J, Leiria-Pinto P, *et al*. Bronchodilator responsiveness using spirometry in healthy and asthmatic preschool children. *Arch Dis Child*. 2013;98:112-7.
15. Crapo RO, Casaburi R, Coates AL, Enright PL, Hankinson JL, Irvin CG, *et al*. Guidelines for methacholine and exercise challenge testing-1999. This official statement of the American Thoracic Society was adopted by the ATS Board of Directors, July 1999. *Am J Respir Crit Care Med*. 2000;161:309-29.
16. Cockcroft DW. Methacholine challenge methods. *Chest*. 2008;134:678-80.
17. Anderson SD, Charlton B, Weiler JM, Nichols S, Spector SL, Pearlman DS, *et al*. Comparison of mannitol and methacholine to predict exercise-induced bronchoconstriction and a clinical diagnosis of asthma. *Respir Res*. 2009;10:4.
18. Martín C, Moreno A. Prueba de broncoprovocación inducida por ejercicio. *An Pediatr Contin*. 2009;7(6):361-4.
19. Baraldi E, Carraro S. Exercise testing and chronic lung diseases in children. *Paediatr Respir Rev*. 2006;7 Suppl 1:S196-8.
20. Teoh OH, Trachsel D, Mei-Zahav M, Selvadurai H. Exercise testing in children with lung diseases. *Paediatr Respir Rev*. 2009;10(3):99-104.
21. Puente L, Martínez Y. Pruebas de ejercicio. Pruebas máximas limitadas por síntomas. En: Burgos Rincón F, Casan Clará P (eds.). *Manual SEPAR de Procedimientos 4*. Barcelona: Permanyer; 2004. p. 64-98.
22. Paridon SM, Alpert BS, Boas SR, Cabrera ME, Calderera LL, Daniels SR, *et al*. Clinical stress testing in the pediatric age group: a statement from the American Heart Association Council on Cardiovascular Disease in the Young, Committee on Atherosclerosis, Hypertension, and Obesity in Youth. *Circulation*. 2006;113(15):1905-20.
23. Moreno A, Martín C. Prueba de broncoprovocación inducida por el ejercicio. *An Pediatr Contin*. 2009;7(6):361-4.
24. Perpina Torderá M, García Río F, Álvarez Gutiérrez FJ, Cisneros Serrano C, Compte Torrero L, Entrenas Costa LM, *et al*. Guidelines for the study of nonspecific bronchial hyperresponsiveness in asthma. Spanish Society of Pulmonology and Thoracic Surgery (SEPAR). *Arch Bronconeumol*. 2013;49(10):432-46.
25. Puente L, Martínez Y. Pruebas de ejercicio. Pruebas máximas limitadas por síntomas. En: Burgos Rincón F, Casan Clará P (eds.). *Manual SEPAR de Procedimientos 4*. Barcelona: Permanyer; 2004. p. 64-98.
26. ATS statement: guidelines for the six-minute walk test. *Am J Respir Crit Care Med*. 2002;166(1):111-7.

27. Fidalgo-Marrón L. Estudio metodológico del test de la marcha de seis minutos en población infantil. En: Universidad Complutense de Madrid [en línea]. Disponible en: <http://eprints.ucm.es/11622/1/T32303.pdf> [consultado el 07/04/2017]
28. Stocks J, Godfrey S, Beardsmore C, Bar-Yishay E, Castile R, on behalf of the ERS/ATS Task Force on Standards for infant respiratory function testing. Plethysmographic measurements of lung volume and airway resistance. *Eur Respir J.* 2001;17:302-12.
29. Wanger J, Clausen JL, Coates A, Pedersen OF, Brusasco V, Burgos F, *et al.* Standardisation of the measurement of lung volumes. *Eur Respir J.* 2005;26:511-22.
30. Lowe LA, Simpson A, Woodcock A, Morris J, Murray CS, Custovic A, *et al.* Wheeze phenotypes and lung function in preschool children. *Am J Respir Crit Care Med.* 2005;171(3):231-7.
31. Klug B, Bisgaard H. Specific airway resistance, interrupter resistance, and respiratory impedance in healthy children aged 2-7 years. *Pediatr Pulmonol.* 1998; 5(5):322-31.
32. Nielsen KG, Pressler T, Klug B, Koch C, Bisgaard H. Serial lung function and responsiveness in cystic fibrosis during early childhood. *Am J Respir Crit Care Med.* 2004;169(11):1209-16.
33. Lum S. Lung function in preschool children: applications in clinical and epidemiological research. *Paediatr Respir Rev.* 2006;Suppl 1:S30-2.
34. Kirkby J, Stanojevic S, Welsh L, Lum S, Badier M, Beardsmore C, *et al.* Reference equations for specific airway resistance in children: the Asthma UK initiative. *Eur Respir J.* 2010;36:622-9.
35. Bussamra MH, Cukier A, Stelmach R, Rodrigues JC. Evaluation of the magnitude of the bronchodilator response in children and adolescents with asthma. *Chest.* 2005;127:530-5.
36. MacIntyre N, Crapo RO, Viegi G, Johnson DC, Van der Grinten CPM, Brusasco V, *et al.* Standardisation of the single-breath determination of carbon monoxide uptake in the lung. *Eur Respir J.* 2005;26:720-5.
37. Hughes JM, Pride NB. Examination of the carbon monoxide diffusing capacity (DL(CO)) in relation to its KCO and VA components. *Am J Respir Crit Care Med.* 2012;186:132-9.
38. Oostveen E, MacLeod D, Lorino H, Farré R, Hantos Z, Desager K, *et al.* The forced oscillation technique in clinical practice: methodology, recommendations and future developments. ERS Task Force. *Eur Respir J.* 2003;22:1026-41.
39. Martínez Gimeno A, Villa Asensi JR. Función pulmonar en el niño colaborador. *Manual de Neumología Pediátrica.* Madrid: Panamericana; 2011.
40. Frei J, Jutla J, Kramer G, Hatzakis GE, Ducharme FM, Davis GM. Impulse oscillometry: reference values in children 100 to 150 cm in height and 3 to 10 years of age. *Chest.* 2005;128:1266-73.
41. Dencker M, Malmberg LP, Valind S, Thorsson O, Karlsson MK, Pelkonen A, *et al.* Reference values for respiratory system impedance by using impulse oscillometry in children aged 2-11 years. *Clin Physiol Funct Imaging.* 2006;26:247-50.
42. Song TW, Kim KW, Kim ES, Park JW, Sohn MH, Kim KE. Utility of impulse oscillometry in young children with asthma. *Pediatr Allergy Immunol.* 2008;19:763-8.

43. Jee HM, Kwak JH, Jung da W, Han MY. Useful parameters of bronchial hyperresponsiveness measured with an impulse oscillation technique in preschool children. *J Asthma*. 2010;47:227-32.
44. Marotta A, Klinnert MD, Price MR, Larsen GL, Liu AH. Impulse oscillometry provides an effective measure of lung dysfunction in 4-year-old children at risk for persistent asthma. *J Allergy Clin Immunol*. 2003;112:317-22.
45. Meraz EG, Nazeran H, Ramos CD, Nava P, Diong B, Goldman MD, *et al*. Analysis of impulse oscillometric measures of lung function and respiratory system model parameters in small airway-impaired and healthy children over a 2-year period. *Biomed Eng Online*. 2011;10:21.
46. Mochizuki H, Hirai K, Tabata H. Forced oscillation technique and childhood asthma. *Allergol Int*. 2012;61:373-83.
47. Galant SP, Nickerson B. Lung function measurement in the assessment of childhood asthma: recent important developments. *Curr Opin Allergy Clin Immunol*. 2010;10:149-54.
48. Shi Y, Aledia AS, Galant SP, George SC. Peripheral airway impairment measured by oscillometry predicts loss of asthma control in children. *J Allergy Clin Immunol*. 2013;131:718-23.
49. Komarow HD, Skinner J, Young M, Gaskins D, Nelson C, Gergen PJ, *et al*. A study of the use of impulse oscillometry in the evaluation of children with asthma: analysis of lung parameters, order effect, and utility compared with spirometry. *Pediatr Pulmonol*. 2012;47:18-26.
50. Shi Y, Aledia AS, Tatavoosian AV, Vijayalakshmi S, Gallant SP. Relating small airways to asthma control by using impulse oscillometry in children. *J Allergy Clin Immunol*. 2012;129:671-8.
51. Olaguibel JM, Alvarez-Puebla MJ, Anda M, Gómez B, García BE, Tabar AI, *et al*. Comparative analysis of the bronchodilator response measured by impulse oscillometry (IOS), spirometry and body plethysmography in asthmatic children. *J Investig Allergol Clin Immunol*. 2005;15:102-6.
52. Vink GR, Arets HG, van der LJ, van der Ent CK. Impulse oscillometry: a measure for airway obstruction. *Pediatr Pulmonol*. 2003;35:317-22.
53. Gappa M, Colin AA, Goez I, Stocks J. Passive respiratory mechanics: the occlusion techniques. *Eur Respir J*. 2001;17:141-8.
54. Merkus PJ, Stocks J, Beydon N, Lombardi E, Jones M, McKenzie SA, *et al*. Reference ranges for interrupter resistance technique: the Asthma UK Initiative. *Eur Respir J*. 2010;36:157-63.
55. Kooi EM, Schokker S, van der Molen T, Duiverman EJ. Airway resistance measurements in pre-school children with asthmatic symptoms: the interrupter technique. *Respir Med*. 2006;100:955-64.
56. Beydon N, Pin J, Matran R, Chaussain M, Boule M, Alain B, *et al*. Pulmonary function tests in preschool children with asthma. *Am J Respir Crit Care Med*. 2003;168:640-4.
57. Beydon N, M'Buila C, Peiffer C, Bernard A, Zaccaria I, Denjean A. Can bronchodilator response predict bronchial response to methacholine in preschool coughers? *Pediatr Pulmonol*. 2008;43:815-21.
58. Beydon N, Trang-Pham H, Bernard A, Gaultier C. Measurements of resistance by the interrupter technique and of transcutaneous partial pressure of oxygen in young children during methacholine challenge. *Pediatr Pulmonol*. 2001;31:238-46.

