

Evaluación de la función pulmonar unilateral mediante tomografía por impedancia eléctrica

J. Bruno de Lema^a, Ernesto Serrano^b, Teresa Feixas^a, Núria Calaf^a, María del Valle. Camacho^c, Pere J. Riu^b y Pere Casan^a

^aUnitat de Funció Pulmonar. Departament de Pneumologia. Hospital de la Santa Creu i Sant Pau. Facultat de Medicina. Universitat Autònoma de Barcelona. Barcelona. España.

^bCentre de Recerca en Enginyeria Biomèdica (CREB). Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona. España.

^cServei de Medicina Nuclear. Hospital de la Santa Creu i Sant Pau. Facultat de Medicina. Universitat Autònoma de Barcelona. Barcelona. España.

OBJETIVO: Comparar la función pulmonar unilateral (FPU) estimada mediante tomografía por impedancia eléctrica (TIE) con la misma determinación obtenida a partir de la gammagrafía de ventilación y perfusión pulmonar

PACIENTES Y MÉTODOS: Se trata de un estudio clínico prospectivo, realizado en un laboratorio de función pulmonar de un hospital general. Se incluyó a 20 pacientes diagnosticados de cáncer de pulmón (17 varones y 3 mujeres, con edades comprendidas entre los 25 y los 77 años), candidatas a cirugía resectiva pulmonar, a quienes se realizó un estudio de ventilación/perfusión pulmonar con radioisótopos.

La FPU se calculó a partir de imágenes en 2 espacios intercostales en las que se representaban la ventilación y la perfusión relacionadas con los cambios en la bioimpedancia eléctrica. Se determinó asimismo la participación de cada pulmón en la función global a partir de estudios isotópicos.

RESULTADOS: El valor promedio \pm desviación estándar de ventilación en el pulmón derecho obtenido mediante TIE fue del $54 \pm 9\%$ (rango: 32-71%). El mismo valor mediante radioisótopos fue del $52 \pm 10\%$ (rango: 31-80%) para la ventilación y del $50 \pm 9\%$ (rango: 37-71%) para la perfusión (prueba de la *t* de Student, *p* no significativa). El coeficiente de correlación entre ambas determinaciones fue de $r = 0,90$ ($p < 0,05$) para la ventilación y de $r = 0,72$ ($p < 0,05$) para la perfusión. El análisis de concordancia mostró una media de las diferencias del 1,9% (intervalo de confianza del 95%, del 10,5 al -6,8%) para la ventilación y del 3,4% (intervalo de confianza del 95%, entre el 17,1 y el -10,3%) para la perfusión.

CONCLUSIONES: La TIE es capaz de cuantificar la FPU con una precisión similar a la gammagrafía de ventilación o perfusión con radioisótopos.

Palabras clave: Función pulmonar unilateral. Tomografía por impedancia eléctrica. Cáncer de pulmón.

Assessment of Differential Lung Function by Electrical Impedance Tomography

OBJECTIVE: To compare unilateral lung function estimated by 2 methods: electrical impedance tomography (EIT) and ventilation-perfusion lung scintigraphy.

PATIENTS AND METHODS: This prospective clinical study was carried out in the pulmonary function laboratory of a general hospital. Twenty patients diagnosed with lung cancer (17 men and 3 women, ranging in age from 25 to 77 years) who were candidates for lung resection underwent ventilation-perfusion lung scanning breathing a radioactive gas.

Differential lung function was estimated based on images taken at 2 intercostal spaces in which ventilation and perfusion were represented by changes in bioelectrical impedance. Each lung's contribution to overall respiratory function was also calculated based on scintigraphy.

RESULTS: The right lung contributed a mean (SD) of 54% (9%) of ventilation (range, 32%-71%) according to EIT. Scintigraphy similarly estimated the right lung's contribution to be 52% (10%) of total ventilation (range, 31%-80%) and 50% (9%) of perfusion (range, 37%-71%). The difference between the 2 estimates was not significant (*t* test), and the correlation coefficients between them were $r=0.90$ for ventilation and $r=0.72$ for perfusion ($P<.05$ in both cases). The analysis of agreement showed that the mean difference between the methods was 1.9% (95% confidence interval [CI], 10.5% to -6.8%) for ventilation and 3.4% (95% CI, 17.1% to -10.3%) for perfusion.

CONCLUSIONS: EIT is able to estimate differential lung function as accurately as ventilation-perfusion scintigraphy.

Key words: Differential lung function. Electrical impedance tomography. Lung cancer.

Introducción

Los procedimientos generalmente utilizados en el laboratorio de función pulmonar informan del comporta-

miento global del sistema respiratorio. No obstante, en determinadas circunstancias, como la resección quirúrgica (lobectomía o neumonectomía), antes de tomar decisiones es importante conocer la participación de cada pulmón en la función global¹. Para valorar lo que se denomina "función pulmonar unilateral" (FPU) se han desarrollado diversos procedimientos: oclusión temporal de la arteria pulmonar², broncospirometría³, pruebas de decúbitos laterales alternativos⁴, gammagrafía de ventilación y perfusión con radioisótopos^{5,6}, tomografía com-

Correspondencia: Dr. P. Casan.
Unitat de Funció Pulmonar. Departament de Pneumologia.
Hospital de la Santa Creu i Sant Pau.
Sant Antoni Maria Claret, 167. 08025 Barcelona. España.
Correo electrónico: pcasan@santpau.es

Recibido: 5-7-2007; aceptado para su publicación: 20-11-2007.

putarizada⁷ y, más recientemente, la observación numérica y gráfica de la transmisión de las vibraciones respiratorias⁸. De todos ellos, la gammagrafía de perfusión obtenida mediante tecnecio-99m (^{99m}Tc) se considera la prueba de referencia en la actualidad⁹. No obstante, este procedimiento utiliza radiaciones ionizantes y su uso está limitado a grandes centros, dadas las condiciones especiales del equipo necesario para su realización. Por este motivo sería deseable disponer de procedimientos más asequibles para los laboratorios de función pulmonar de cualquier centro.

La tomografía por impedancia eléctrica (TIE) es un sistema de obtención de imágenes que pueden cuantificarse, fruto de la inyección de una corriente eléctrica que atraviesa las diferentes estructuras corporales, y se ha aplicado recientemente en el ámbito de la neumología¹⁰. Entre sus principales ventajas se apuntan la ausencia de radiaciones, su portabilidad y fácil manejo, así como su bajo coste. El reciente desarrollo de este tipo de equipos ha permitido probar su bondad en diversas áreas del ámbito respiratorio (patrón ventilatorio, derrames pleurales, etc.)¹¹ y también en la cuantificación de la FPU¹².

El objetivo de nuestro trabajo ha sido comparar los valores de FPU estimados mediante TIE con los obtenidos mediante gammagrafía de ventilación y perfusión con radioisótopos, en un grupo de pacientes diagnosticados de cáncer de pulmón y candidatos a cirugía resectiva.

Pacientes y métodos

Pacientes

Se estudió a 20 pacientes (17 varones y 3 mujeres) diagnosticados de cáncer de pulmón, con una edad media \pm desviación estándar de 65 ± 18 años (rango: 25-77), que acudieron de forma consecutiva al laboratorio para estudio preoperatorio de cirugía resectiva pulmonar. En todos ellos estaba indicada la realización de una gammagrafía de ventilación/perfusión para evaluar el riesgo quirúrgico.

Diseño del estudio

El estudio se realizó en el Laboratorio de Función Pulmonar y en el Servicio de Medicina Nuclear de nuestro centro. Las pruebas respiratorias efectuadas, todas ellas según el procedimiento habitual en el laboratorio, que sigue las recomendaciones de la Sociedad Española de Neumología y Cirugía Torácica (SEPAR), fueron: espirometría, volúmenes pulmonares estáticos, transferencia al monóxido de carbono y gases arteriales. Se aleatorizó a los pacientes para que realizaran la prueba de FPU (gammagrafía y TIE) en 2 días consecutivos. El estudio fue aprobado por el Comité de Ética del Hospital y los pacientes firmaron el consentimiento informado.

Procedimiento de la tomografía por impedancia eléctrica

Las determinaciones se realizaron mediante un equipo de tomografía (TIEsys-4) de 16 electrodos fabricado por los ingenieros del grupo (E.S. y P.J.R.), previamente validado y utilizado en el laboratorio para éstos y otros procedimientos¹². El equipo cumplía las normas de calidad y seguridad de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC 60601-1, 1992) para material eléctrico de utilización médica. El ritmo de adquisi-

ción de señales fue de 10 imágenes/s y en cada paciente se resumieron un promedio de 300 imágenes que se obtuvieron por duplicado.

Los planos de lectura en el tórax fueron el cuarto y sexto espacios intercostales y se colocaron electrodos de alta calidad (Red Dot 2560, 3M, London, Ontario, Canadá) después de limpiar la piel adecuadamente. Con el paciente cómodamente sentado y con los brazos en cruz, oportunamente sustentados¹¹, se identificaron previamente los puntos de colocación de los electrodos, que se distribuyeron a lo largo de los espacios intercostales. El electrodo número 0 se colocó sobre el esternón; el electrodo número 4, en la línea axilar media izquierda; el número 8, sobre el mismo lugar de la línea axilar derecha, y el número 12, sobre la columna vertebral. Los 12 electrodos restantes se distribuyeron de forma equidistante entre los 4 espacios y, por último, se conectaron a los cables y se cubrió el tórax con una malla elástica para fijar el conjunto.

La bioimpedancia se reconstruyó asignando una forma circular al corte transversal del tórax y separando las señales cardíacas de las respiratorias con los filtros oportunos. La participación de cada pulmón en la ventilación global se calculó distribuyendo porcentualmente las imágenes y el número de píxeles que se registraba en cada círculo.

Procedimiento de gammagrafía de ventilación y perfusión

Para la gammagrafía de ventilación el paciente, que estaba cómodamente sentado, se conectó mediante una boquilla a un dispensador de radioisótopos que contenía 74 MBq (2 mCi) de partículas de grafito marcadas con ^{99m}Tc en un circuito cerrado, a través del cual las partículas se distribuyeron en ambos pulmones. La posterior adquisición de imágenes se realizó mediante una gammacámara (Symbia, Siemens, Erlangen, Alemania) equipada con un colimador de alta resolución y baja energía, que permitió registrar las imágenes de distribución del radioisótopo en cada pulmón y expresar esta distribución en porcentaje.

Para el estudio de perfusión, el paciente se situó en decúbito supino y se cateterizó una vena periférica por la que se inyectaron lentamente 296 MBq (8 mCi) de macroagregados de albúmina marcados con ^{99m}Tc mientras el paciente respiraba profundamente durante 3 maniobras de capacidad vital. La distribución del isótopo fue captada y cuantificada por la misma gammacámara anterior.

Análisis estadístico

Los resultados se presentan como valores medios y distribución típica. Las medias se compararon entre sí mediante la prueba de la t de Student para datos emparejados, y se utilizó el coeficiente de correlación lineal de Pearson para comparar los valores. Para valorar las diferencias se empleó el análisis de concordancia de Altman-Bland. En todos los casos se consideraron significativos los valores de $p < 0,05$.

Resultados

El valor medio \pm desviación estándar de la participación del pulmón derecho en la función global, obtenido mediante TIE, fue del $54 \pm 9\%$ (rango: 32-71%). La participación del pulmón derecho estimada mediante la gammagrafía de ventilación fue del $52 \pm 10\%$ (rango: 31-80%) y mediante la gammagrafía de perfusión, del $50 \pm 9\%$ (rango: 37-71%). La prueba de la t de Student para datos emparejados no mostró diferencias estadísticas con ninguna de las comparaciones entre grupos. El

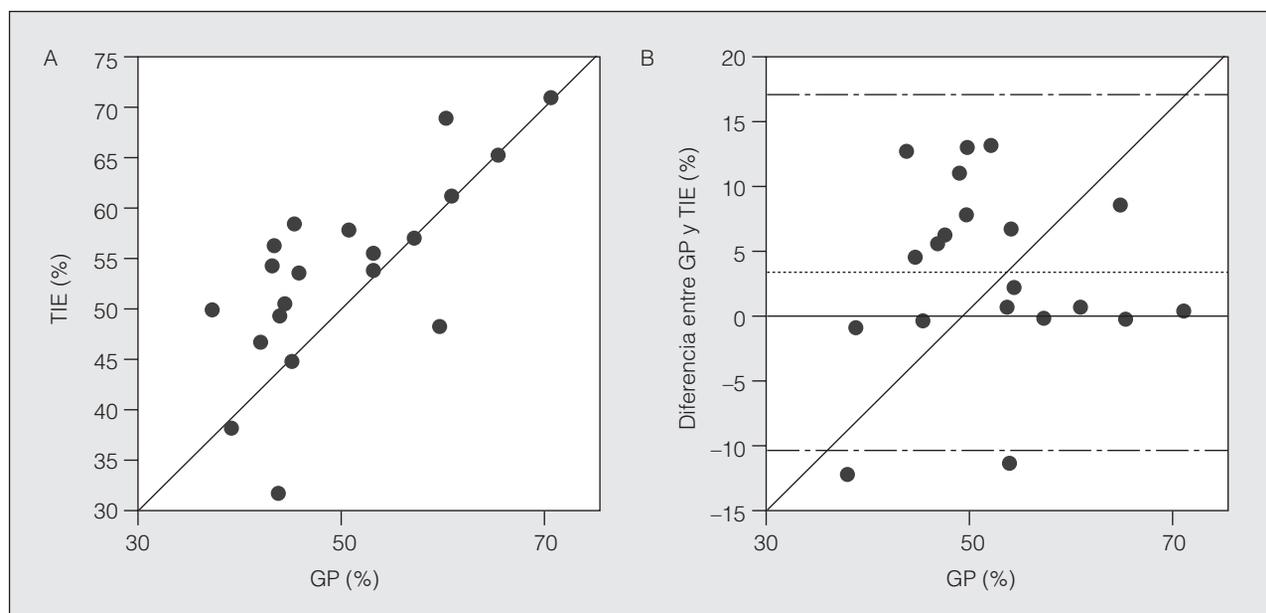


Fig. 1. A: correlación lineal (Pearson) entre la tomografía por impedancia eléctrica (TIE) y la gammagrafía de perfusión (GP). B: análisis de concordancia de Bland-Altman entre las 2 técnicas.

coeficiente de correlación lineal (r de Pearson) entre el valor obtenido por TIE y el de la gammagrafía de ventilación fue de 0,90 ($p < 0,05$), y entre el del TIE y el de la gammagrafía de perfusión, de 0,72 ($p < 0,05$).

El análisis de concordancia entre el valor obtenido por la TIE y el de la gammagrafía de ventilación demostró una diferencia media del 1,85% (intervalo de confianza del 95%, 10,5 a -6,8%). Un único paciente (caso 5) mostró unos valores de participación fuera de los límites marcados por el intervalo de confianza del 95%. La media de las diferencias entre el valor obtenido por la TIE y el determinado por la gammagrafía de perfusión fue del 3,4% (intervalo de confianza del 95%, 17,1 a -10%). En este caso, 2 pacientes (casos 8 y 9) quedaron fuera del intervalo estadístico mencionado. Estos 3 pacientes con valores extremos tenían en común la realización de cirugía torácica previa a la valoración funcional. Los datos de cada paciente estudiado se resumen en la tabla I y el análisis de concordancia en las figuras 1 y 2.

Discusión

La TIE es una técnica de reciente introducción en el ámbito de la neumología, para la que se están buscando utilidades clínicas. En el presente estudio se ha pretendido valorar su utilidad en la determinación de la FPU, y los resultados obtenidos muestran una buena concordancia con los datos de ventilación y perfusión pulmonares con radioisótopos. Nuestros resultados confirman los descubrimientos previos de Kunst et al¹³ en un grupo de pacientes muy parecidos. De la misma forma, Hinz et al¹⁴ también informaron de hallazgos muy similares en animales de experimentación, en los que se comparaba la FPU mediante TIE y tomografía computarizada por emisión de fotones únicos.

Nuestro equipo de TIE se validó previamente en individuos sanos¹¹. El coeficiente de correlación entre los valores estimados como teóricos y los porcentajes de participación en cada individuo, así como el análisis de concordancia obtenido, permitió plantear la bondad de este procedimiento para el estudio de la FPU en ambientes clínicos. Sin embargo, en 3 pacientes cuya morfología torácica se había modificado previamente por cirugía, los resultados no fueron tan alentadores. Al pa-

TABLA I
 Características de los pacientes y resultados de la función pulmonar unilateral

Caso	Sexo	Edad (años)	FVC (%)	FEV ₁ (%)	GV (%)	GP (%)	TIE (%)
1	V	77	104	71	53,8	44,4	50,4
2	V	59	84	75	60,5	60,3	68,9
3	M	72	121	122	53,1	53,3	55,5
4	V	52	103	84	38,4	39,2	38,3
5	V	25	60	59	80,1	70,6	70,9
6	V	58	99	61	63,6	65,4	65,2
7	V	67	61	68	48,6	45,4	58,5
8	V	49	86	32	31	43,8	31,9
9	V	60	86	79	53,4	59,6	48,3
10	M	76	87	80	49,3	37,4	50
11	V	47	87	67	50,9	45,8	53,7
12	V	50	104	71	47,8	43,4	54,3
13	V	56	75	49	52,1	53,2	53,9
14	M	58	76	78	54,9	50,9	57,7
15	V	67	62	44	44,2	43,9	49,5
16	V	71	69	45	52	43,5	56,3
17	V	69	71	58	44,3	45,2	45
18	V	65	69	43	55,8	60,8	61,3
19	V	66	65	75	56	57	57
20	V	57	95	90	47,2	42,2	46,8

FEV₁: volumen espiratorio forzado en el primer segundo; FVC: capacidad vital forzada; GP: gammagrafía de perfusión; GV: gammagrafía de ventilación; M: mujer; TIE: tomografía por impedancia eléctrica; V: varón.

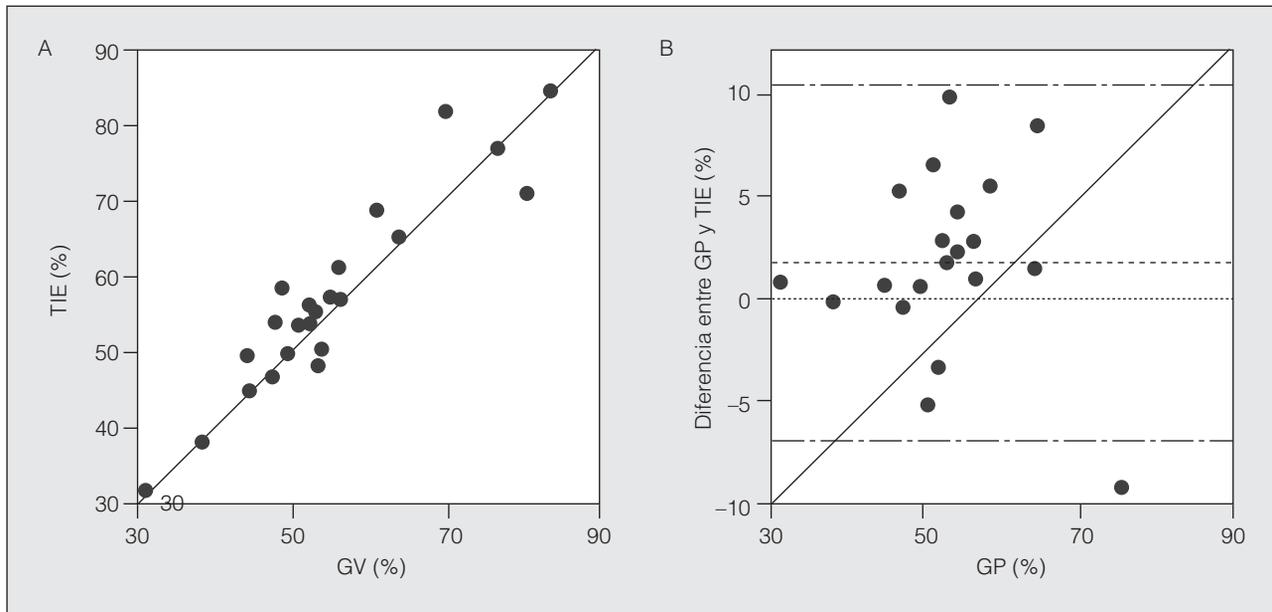


Fig. 2. A: correlación lineal (Pearson) entre la tomografía por impedancia eléctrica (TIE) y la gammagrafía de ventilación (GV). B: análisis de concordancia de Bland-Altman entre las 2 técnicas.

recer la morfología torácica desempeña un papel importante a la hora de establecer diferencias que puedan ser atribuibles, en parte, al método utilizado para reconstruir las imágenes torácicas en la TIE o a la propia señal derivada del tórax. El modelo matemático utilizado para los cálculos tiene en cuenta un tórax circular, con una distribución “homogénea” o “común” de las estructuras internas¹⁵, que difiere de lo encontrado en un tórax con deformidades externas o con modificaciones internas. Este aspecto deberá tenerse muy en cuenta cuando se intente utilizar este procedimiento en situaciones anatómicas como las descritas.

Otro aspecto al que hay que atender es la existencia de “ruido” eléctrico en las señales captadas por la TIE, fruto, entre otros motivos, de la dificultad de transmisión eléctrica a través del tórax. El tipo de electrodos, no siempre de alta calidad, la necesidad de limpiar adecuadamente la piel en la zona de contacto, la ausencia de pelo, la naturaleza de los cables de conducción, etc. son todos ellos elementos prácticos que dificultan la recepción de las señales y su cuantificación. Aunque algunos de estos aspectos se han documentado con anterioridad y son conocidos¹¹, no siempre pueden resolverse en la práctica clínica.

Otro punto de interés es la reducción del número de electrodos para simplificar el procedimiento de recogida de señales. Hemos intentado reducir de 16 a 8 el número de electrodos, pero los resultados no son lo suficientemente concluyentes para que puedan extrapolarse en la actualidad a todas las determinaciones¹⁶.

Debido al pequeño tamaño de la muestra estudiada y a las dificultades en el seguimiento de estos pacientes, tan sólo en 4 (casos 2; 7; 11, y 14 de la tabla I) pudo realizarse una espirometría a los 6 meses de la cirugía de resección. Los valores teóricos de volumen espiratorio forzado en el primer segundo previstos por la gamma-

grafía fueron del 53, el 44, el 41 y el 55%, respectivamente; los previstos por la TIE, del 50, el 48, el 40 y el 50%, y los valores reales, del 56, el 50, el 43 y el 57%, respectivamente. El escaso número de casos hace innecesaria la comparación estadística, aunque los valores fueron en apariencia muy similares.

En resumen, la TIE es un procedimiento sencillo, que requiere una tecnología al alcance de centros no especialmente preparados, sin utilización de radiaciones ionizantes y de bajo coste. Puede emplearse con ciertas ventajas para la determinación de la FPU en pacientes candidatos a cirugía de resección pulmonar. No obstante, algunos inconvenientes, fruto de la necesidad de disponer de equipos aún más simplificados y mejor preparados, así como la difícil interpretación de los datos en pacientes con deformidades torácicas o cirugía previa, obligan a la cautela en su indicación definitiva. Será necesario realizar nuevos estudios y en circunstancias distintas para evaluar mejor sus indicaciones y contraindicaciones.

BIBLIOGRAFÍA

1. Beckles MA, Spiro SG, Colice GL, Rudd RM. The physiologic evaluation of patients with lung cancer being considered for resectional surgery. *Chest*. 2003;123 Suppl 1:105-14.
2. Carlens E, Hanson HE, Nordestrom B. Temporary unilateral occlusion of the pulmonary artery; a new method of determining separate lung function and of radiologic examinations. *J Thorac Surg*. 1951;22:527-36.
3. Neuhaus H, Cherniack NS. A bronchspirometric method of estimating the effect of pneumonectomy on the maximum breathing capacity. *J Thorac Cardiovasc Surg*. 1968;55:144-8.
4. Bergan F. A simple method for determination of the relative function of the right and left lung. *Acta Chir Scand*. 1960;253 Suppl: 58-63.
5. Olsen GN, Block AJ, Tobias JA. Prediction of postpneumonectomy pulmonary function using quantitative macroaggregate lung scanning. *Chest*. 1974;66:13-6.

BRUNO DE LEMA J ET AL. EVALUACIÓN DE LA FUNCIÓN PULMONAR UNILATERAL
MEDIANTE TOMOGRAFÍA POR IMPEDANCIA ELÉCTRICA

6. Wernly JA, DeMeester TR, Kirchner PT, Myerowitz PD, Oxford DE, Golomb HM. Clinical value of quantitative ventilation-perfusion lung scans in the surgical management of bronchogenic carcinoma. *J Thorac Cardiovasc Surg.* 1980;80:535-43.
7. Wu MT, Chang JM, Chiang HA, Lu JY, Hsu HK, Hsu WA, et al. Use of quantitative CT to predict postoperative lung function in patients with lung cancer. *Radiology.* 1994;191:257-62.
8. Dellinger RPh, Jean S, Cinel I, Tay C, Rajanala S, Glickman YA, et al. Regional distribution of acoustic-based lung vibration as a function of mechanical ventilation mode. *Crit Care Med.* 2007;11: R26.
9. British Thoracic Society winter meeting 2001. London, United Kingdom. 5-7 December 2001. *Thorax.* 2001;56 Suppl 3:1-98 [fe de errores en: *Thorax.* 2002;57:376].
10. Barber DC, Brown BH. Applied potential tomography. *J Br Interplanet Soc.* 1989;42:391-3.
11. De Lema B, Casan P, Riu P. Tomografía por impedancia eléctrica. Estandarización del procedimiento para su aplicación en neumología. *Arch Bronconeumol.* 2006;42:299-301.
12. Serrano RE, De Lema B, Casas O, Feixas T, Calaf N, Camacho V, et al. Use of electrical impedance tomography (EIT) for the assessment of unilateral pulmonary function. *Physiol Meas.* 2002; 23:211-20.
13. Kunst PW, Vonk Noordegraaf A, Hoekstra OS, Postmus PE, De Vries PM. Ventilation and perfusion imaging by electrical impedance tomography: a comparison with radionuclide scanning. *Physiol Meas.* 1998;19:481-90.
14. Hinz J, Neumann P, Dudykevych T, Andersson LG, Wrigge H, Buchardi H, et al. Regional ventilation by electrical impedance tomography: a comparison with ventilation scintigraphy in pigs. *Chest.* 2003;124:314-22.
15. Casas O, Rosell J, Bragós R, Lozano A, Riu PJ. A parallel broadband real-time system for electrical impedance tomography. *Physiol Meas.* 1996;17 Suppl 4:1-6.
16. Serrano RE, Riu PJ, De Lema B, Casan P. Assessment of the unilateral pulmonary function by means of electrical impedance tomography using a reduced electrode set. *Physiol Meas.* 2004;25: 803-13.