



## Tomografía por emisión de positrones

Omar Francisco Coronel Ayala,\* José Antonio Serna Macías,\*\* René Bourlon Cuellar,\*\*\* María Teresa Bourlon de los Ríos,\*\*\*\* Miguel Ángel Gómez Sámano\*\*\*\*

### RESUMEN

Toda enfermedad tiene una historia natural y su evolución se debe a diferentes procesos biológicos. Uno de estos incluye el proceso dinámico, del cual no pueden obtenerse las imágenes que reflejan la actividad corporal, a menos que se realice alguna determinación metabólica y se compare con el resto de las funciones fisiológicas. En este contexto, la tomografía por emisión de positrones proporciona información de dichos procesos y ofrece un punto de vista diferente del resto de las modalidades de imagen. La finalidad de la tomografía por emisión de positrones es producir imágenes que ilustren la función fisiológica y específica de algún proceso molecular; por lo tanto, se utiliza para determinar el metabolismo de la glucosa, la perfusión y el flujo sanguíneo, la tasa de unión de los complejos receptor-ligando y el intercambio de oxígeno. Con estas imágenes se distinguen los estados funcionales, normales o alterados, de alguna estructura específica. En comparación con la medicina nuclear, la tomografía por emisión de positrones utiliza radiofármacos (radiotrazadores marcados), como: carbono, oxígeno, nitrógeno y flúor (elementos básicos de los sustratos biológicos). Estos isótopos se parecen a los sustratos naturales como azúcares, agua, proteínas y oxígeno. Dicha técnica modifica la tasa costo-beneficio en el área de la oncología, cardiología y neurología para el tratamiento del paciente, además de proporcionar las siguientes ventajas: a) diagnosticar enfermedades antes que se produzcan cambios estructurales; b) vigilar la respuesta al tratamiento; c) pronosticar procedimientos quirúrgicos innecesarios, y d) detectar metástasis distantes u ocultas.

**Palabras clave:** tomografía por emisión de positrones, oncología, radiotrazadores.

### ABSTRACT

Any illness has a natural history which course is due to different biological processes. Dynamic process cannot obtain an image that reflects this activity, except we could make a metabolic determination and comparison with the rest of the physiological process. The positron emission tomography offers information of these processes and gives us a different point of view in comparison to the rest of the other image modalities. Its main objective is the production of images that illustrate the physiologic function at a molecular level of some specific process, thus it is used to carry out the measurement of different vital processes (metabolism of glucose, perfusion and flow on certain tissues, rates of receiving union of complexes ligand-receptor and the oxygen exchange). With these images we can distinguish between a normal to abnormal functional in some particular structures. In comparison with the traditional nuclear medicine, positron emission tomography uses radiotracers markers like carbon, oxygen, nitrogen and fluorine (basic elements of the biological substrates). These isotopes looks like the natural substrata like sugars, water, proteins and oxygen. This technique modifies the rate cost-benefit in oncology, neurology, and cardiology field, to patient treatment. Moreover proved the benefits: a) to diagnosticate diseases before structural changes take place; b) monitoring the treatment response; c) to avoid unnecessary surgical procedures, and d) detect a distant or hidden metastasis.

**Key words:** Positron emission tomography, oncology, radiotracers.

\* Residente de medicina interna.

\*\* Médico adscrito al Departamento de radiología.

\*\*\* Médico adscrito al servicio de medicina interna.

Hospital Ángeles del Pedregal.

\*\*\*\* Médico interno de pregrado de la Universidad Panamericana.

Correspondencia: Dr. René Bourlon Cuellar. Servicio de medicina interna. Hospital Ángeles del Pedregal. Camino a Santa Teresa núm. 1055, col. Héroes de Padierna, CP 10700, México, DF.

E-mail: rbourlon@angeles.com.mx

Recibido: agosto, 2006. Aceptado: febrero, 2007.

La versión completa de este artículo también está disponible en internet: [www.revistasmedicasmexicanas.com.mx](http://www.revistasmedicasmexicanas.com.mx)

**T**oda enfermedad tiene una historia natural y su evolución se debe a diferentes procesos biológicos. Uno de estos incluye el proceso dinámico, del cual no pueden obtenerse las imágenes que reflejan la actividad corporal, a menos que se realice alguna determinación metabólica y se compare con el resto de las funciones fisiológicas.<sup>1</sup>

En este contexto, la tomografía por emisión de positrones proporciona información de dichos procesos

y ofrece un punto de vista diferente del resto de las modalidades de imagen (TAC, RM, etc.), que son principalmente estructurales.

Con el advenimiento de la secuenciación genómica hubo la necesidad de caracterizar el fenotipo. Con base en esto, la imagenología permite estudiar su morfología y función de forma no invasiva.

Los criterios clásicos de las enfermedades, relacionados con los cambios morfológicos (estructurales), son insuficientes para realizar el diagnóstico o clasificarlas e incapaces de evaluar la respuesta de algún tratamiento. La imagenología funcional y molecular se introdujo como apoyo en el área de la oncología.<sup>2</sup>

A partir de 1950 se reportaron las primeras aplicaciones de la radiación por aniquilación de positrones. Brownell mejoró la calidad de las imágenes del encéfalo, ya que incrementó la sensibilidad y resolución de dicha técnica. En 1952 fabricó un gammógrafo para estudiar a los pacientes con presunto tumor cerebral. A pesar de lo rudimentario del primer instrumento, las imágenes obtenidas resultaban mejores que las adquiridas por otros medios. Esto motivó a mejorar la técnica, hasta alcanzar los progresos que hoy conocemos.<sup>3</sup>

## IMAGENOLOGÍA FUNCIONAL

Un estudio de imagen no sólo debe contemplarse para mejorar la resolución y especificidad, sino para establecer la diferencia entre lesiones malignas y benignas. Los parámetros funcionales (flujo sanguíneo, permeabilidad vascular y metabolismo) mejoran la especificidad en las enfermedades oncológicas. Éstos se evalúan, generalmente, mediante la tomografía axial computada, resonancia magnética y tomografía por emisión de positrones.<sup>3</sup>

### ¿Cómo se compara la tomografía por emisión de positrones con otras modalidades de imagen?

La tomografía por emisión de positrones proporciona información relacionada con el diagnóstico de sospecha clínica, además de ayudar a establecer el tratamiento adecuado y pronosticar el costo total de la atención del paciente.

La finalidad de la tomografía por emisión de positrones es producir imágenes que ilustren la función

fisiológica y específica de algún proceso molecular; por lo tanto, se utiliza para determinar distintos procesos vitales, como el metabolismo de la glucosa, la perfusión y el flujo sanguíneo, la tasa de unión de los complejos receptor-ligando y el intercambio de oxígeno. Con estas imágenes se distinguen los estados funcionales, normales o alterados, de alguna estructura específica.

Esta tecnología sobrepasa las diferentes modalidades de imagen, como la tomografía axial computada y la resonancia magnética nuclear. La tomografía por emisión de positrones, al igual que la TAC y la RM, utiliza algoritmos tomográficos para desplegar los datos obtenidos y emitir imágenes en varios planos. Como en la medicina nuclear, estas imágenes representan la biodistribución de los radiotrazadores internos.

### Diferencias entre la tomografía por emisión de positrones y otras modalidades

#### *Determinación de los procesos fisiológicos*

La tomografía por emisión de positrones evalúa los cambios químicos y fisiológicos que resultan del metabolismo celular, en comparación con la resonancia magnética o la tomografía axial computada que solamente se enfocan en los cambios anatómicos. La tomografía por emisión de positrones detecta y evalúa los cambios funcionales o dinámicos que ocurren antes de producirse las modificaciones estructurales en los tejidos (secundarias a los procesos patológicos). Sus imágenes muestran las alteraciones patológicas más rápido que los estudios con TAC o RM en un mismo padecimiento.

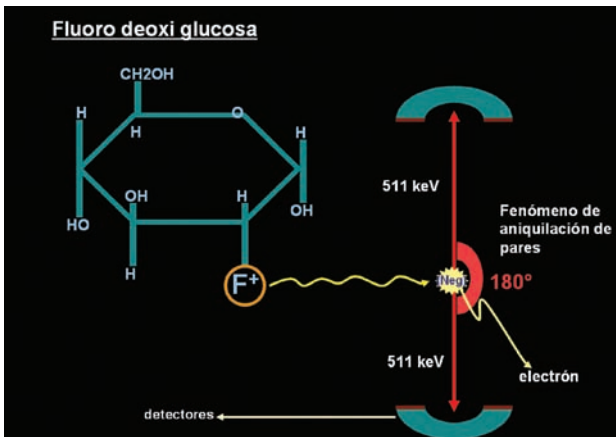
En comparación con la medicina nuclear tradicional, la tomografía por emisión de positrones utiliza radiofármacos (radiotrazadores marcados) como: carbono, oxígeno, nitrógeno y flúor (elementos básicos de los sustratos biológicos). Estos isótopos se parecen a los sustratos naturales como: azúcares, agua, proteínas y oxígeno.

### Principios de la tomografía por emisión de positrones

La tomografía por emisión de positrones es un método analítico que utiliza compuestos marcados. Como su nombre lo indica, utiliza positrones que emiten radioisótopos, como huellas moleculares, para producir una imagen y medir los procesos biológicos *in vivo*.<sup>1</sup>

El positrón es una partícula elemental, cuya masa y espín son iguales a las del electrón, pero de carga eléctrica positiva. Se considera antipartícula *del electrón*.

Después de emitirse desde el núcleo de un átomo, el positrón viaja a corta distancia (a través del tejido circundante) y pierde energía conforme colisiona con otras moléculas (figura 1).

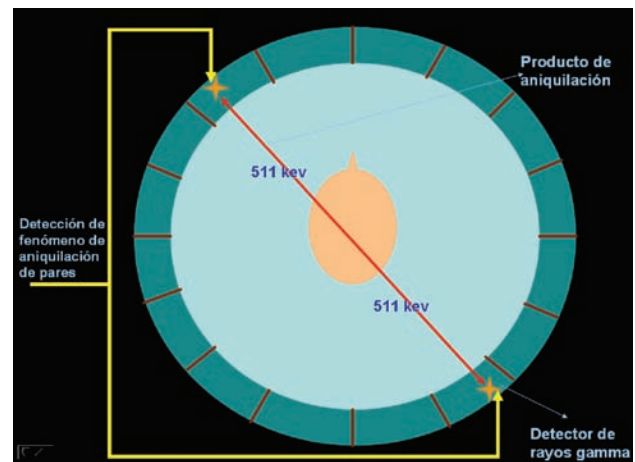


**Figura 1.** Una molécula biológicamente activa (glucosa) se marca con un positrón (radioisótopo) que emite un par de fotones, por ejemplo: fluorodesoxiglucosa (FDG). La FDG se inyecta por vía intravenosa, se distribuye en el torrente sanguíneo y penetra en los órganos. Los positrones que se emiten, a partir del núcleo de la FDG, son antielectrones que viajan a corta distancia; al hacer contacto con el electrón, ocurre el suceso de aniquilación entre sus masas y se convierte en energía, según su equivalencia ( $E=mc^2$ ), mediante dos fotones de 511-keV separados a  $180^\circ$ . Los fotones se detectan de forma electrónica, en cuestión de nanosegundos, al entrar en contacto con los detectores. La figura ilustra una sola línea de detección de coincidencia, pero en la tomografía actual, 6 a 70 millones de pares de detectores graban sucesos desde diferentes ángulos. Después de corregir la atenuación de los fotones, las imágenes anatómicas del tejido de concentración se reconstruyen. Los bloques de detectores sufren arreglos alrededor de la circunferencia; cada uno contiene de 32 a 64 elementos que suman decenas de miles de elementos. Los exámenes proporcionan cientos de planos tomográficos de un solo órgano o de todo el cuerpo. Por ejemplo, un solo corte longitudinal del cuerpo de una mujer puede identificar la metástasis pulmonar proveniente de un tumor primario en el ovario, previamente tratado. La resolución tridimensional de la imagen por emisión de positrones es de 5 a 6 mm.<sup>1</sup>

Al acercarse con las moléculas, choca y se combina con un electrón orbital, y la masa de ambas partículas se transforma en energía. Este fenómeno se denomina aniquilación de pares. La energía resultante se dispersa en forma de fotones (dos rayos  $\gamma$ ) de alta energía, donde se propagan hacia afuera y en direcciones opuestas a  $180^\circ$ .<sup>4</sup>

### Imágenes por coincidencias

Las imágenes obtenidas por emisión de positrones se detectan por rayos  $\gamma$  que rodean al paciente (figura 2). Cuando los detectores captan un fotón, como resultado del fenómeno de aniquilación de pares, uno de éstos (localizado en situación opuesta) busca su fotón correspondiente (que viajó en dirección opuesta a  $180^\circ$ ) hasta encontrarse y se graban en nanosegundos uno al otro; posteriormente, los detectores registran una línea de coincidencia alrededor de los otros detectores (línea de respuesta), el sistema dibuja y analiza las líneas de



**Figura 2.** La tomografía por emisión de positrones detecta los fenómenos de aniquilación de pares mediante detectores de rayos  $\gamma$  que rodean al paciente. Dicha detección produce una línea de respuesta (flecha roja) que se traduce en una zona de captación.

respuesta, entre cada par de detectores, y registra un suceso de coincidencia durante el examen tomográfico.

Al terminar la exploración tomográfica se producen áreas de sobreposición lineal que indican mayor radiactividad en dichos lugares (elevada concentración de las líneas de respuesta). Esto indica que entre mayor sea el número de coincidencias detectadas, mayor será la precisión del cálculo.

El sistema utiliza esta información para construir una imagen mediante algoritmos similares a los aplicados en la tomografía axial computada, resonancia magnética y tomografía por emisión de fotón único.

### Aplicaciones

La tomografía por emisión de positrones modifica la tasa costo-beneficio en las áreas de oncología, cardiología y neurología para el tratamiento del paciente.

En la investigación se utiliza con la finalidad de explorar la fisiopatología de diversos padecimientos. Por sus características, se relaciona con diferentes especialidades para:

- Diagnosticar enfermedades antes que se produzcan cambios estructurales (vistos por técnicas anatómicas). Mejora el pronóstico.
- Optimizar y vigilar la respuesta del tratamiento (retroalimentación temprana en su eficacia); disminuir o evitar el costo de tratamientos inefectivos u hospitalizaciones innecesarias.
- En algunos casos reemplaza varios estudios diagnósticos con un solo examen.
- Pronosticar procedimientos quirúrgicos innecesarios y reducir de manera significativa los costos.
- Detectar metástasis distantes u ocultas que afectan la reacción del tratamiento, y ayudar con la modificación del tratamiento del paciente.

#### **En oncología**

La tomografía por emisión de positrones se relaciona directamente con la oncología, pues ayuda con el diagnóstico diferencial para distinguir lesiones malignas y benignas. Ésta se ilustra mejor en el caso de los nódulos pulmonares, donde se ha encontrado que su sensibilidad es de 96.8% y su especificidad de 77.8. La tomografía por emisión de positrones no debe utilizarse como método de tamiz en la población general.

#### **Importancia de la tomografía por emisión de positrones como marcador biológico**

La evolución de las lesiones neoplásicas que no corresponden al tipo de células pequeñas tiene diferentes patrones de comportamiento. Éstas implican diseminación de células tumorales y elevada tasa de crecimiento, mientras que otras siguen un curso con menor afectación.

La clasificación TNM menciona el pronóstico del padecimiento, pero no predice la agresividad tumoral; por lo tanto, la tomografía por emisión de positrones es útil como marcador de agresividad biológica, para identificar a los pacientes con enfermedades en estadios tempranos.

La tomografía por emisión de positrones distingue entre células malignas y células sanas. Esto supone que

dicha técnica pronostica la tasa metabólica tumoral y el grado de agresividad biológica. La intensidad de las imágenes se relaciona con la velocidad de proliferación tumoral y con el crecimiento de la neoplasia.<sup>5</sup>

La intensidad de captación de la 2-18-fluoro-2-deoxi-D-glucosa (18-FDG), por el tumor primario (expresado en valor de captación estandarizado), se vincula con la recurrencia y supervivencia del padecimiento. Este valor indica la cantidad de milicuries de FDG por gramo en el tejido.

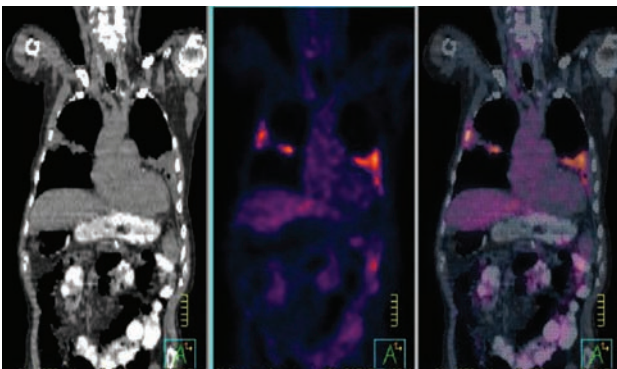
Los estudios señalan mayor supervivencia en los pacientes dicotomizados y con menor actividad tumoral, cuando se estima mediante el valor de captación estandarizado. La supervivencia valorada a dos años, en los pacientes con valor mayor de 5.83%, es de 91%.<sup>6-8</sup> Los estudios multivariados demuestran que la intensidad de las imágenes obtenidas por emisión de positrones son pronósticos independientes de supervivencia (además del estadio y el comportamiento de la enfermedad). Los valores de captación estandarizados pronostican peor índice de supervivencia en los pacientes en etapa I sometidos a resección tumoral.

#### **Tomografía por emisión de positrones para evaluar la restadificación después del tratamiento complementario nuevo**

Varios estudios señalan como poco práctica a la quimiorradioterapia después de la resección tumoral (ensayos fase III), especialmente en los pacientes con carcinoma pulmonar de células no pequeñas. Debido a esto, surge la siguiente incógnita: ¿cuándo pueden pronosticar las imágenes por emisión de positrones una respuesta completa en un sitio específico?, la respuesta que se obtenga tiene dos utilidades para establecer el tratamiento del paciente: la primera, predecir que la resección sea innecesaria o que no se realice; y la segunda, sugerir el pronóstico para la eliminación total del tumor de los ganglios mediastínicos (considerado un buen marcador pronóstico después de la resección). La restadificación por tomografía axial computada es poco confiable, y someter al paciente a un procedimiento invasivo (mediastinoscopia) es difícil, costoso y generalmente no se realiza en cualquier hospital. Esto indica que el grado de confianza para evaluar la respuesta mediastínica, después de la quimiorradioterapia, es pobre. La experiencia de un

hospital de Zurich indica que la tomografía por emisión de positrones y la tomografía coronaria mejora la estadificación T en los pacientes con tumores de tórax. La neoplasia puede ser exactamente definida, porque indica si hay infiltración hacia el mediastino o solamente en la pared torácica (el estadio T3 es potencialmente resecable).

Las imágenes obtenidas en estadio N proporcionan 6% más de información y ayudan a disminuir las mediastinoscopias en 12% de los pacientes. La tomografía por emisión de positrones/tomografía coronaria, efectuada en estadio M, demuestra sensibilidad de 94%, especificidad de 95% y certeza diagnóstica de 96%. Estos hallazgos favorecen el cambio terapéutico en 20% de los pacientes (figura 3).



**Figura 3.** Paciente masculino de 79 años de edad con un nódulo en pulmón derecho (dos años atrás). Hace un año manifestó tos intensa y se trató como neumonía. La tomografía axial computada reportó áreas extensas de consolidación de ambos pulmones, más evidente en el lóbulo inferior izquierdo. La broncoscopia tuvo resultados de carcinoma broncoalveolar con nódulos y zonas de atelectasia. Motivo del estudio PET/CT: estadificación. Las imágenes mostraron una masa pulmonar en el lóbulo superior derecho (hipermetabólica) que correspondió al tumor primario; se extendió a la pleura con metástasis en el pulmón contralateral y depósito óseo secundario en el cuarto arco costal anterior derecho. El paciente cambió su esquema a radio y quimioterapia.

#### Cambios tempranos en la tomografía por emisión de positrones para evaluar la respuesta del tratamiento

La tomografía por emisión de positrones disminuye la intensidad de sus imágenes cuando un paciente inicia algún tratamiento terapéutico (días o semanas). Un estudio demostró mejor intensidad tres semanas después de terminar un ciclo de quimioterapia, en comparación con el examen

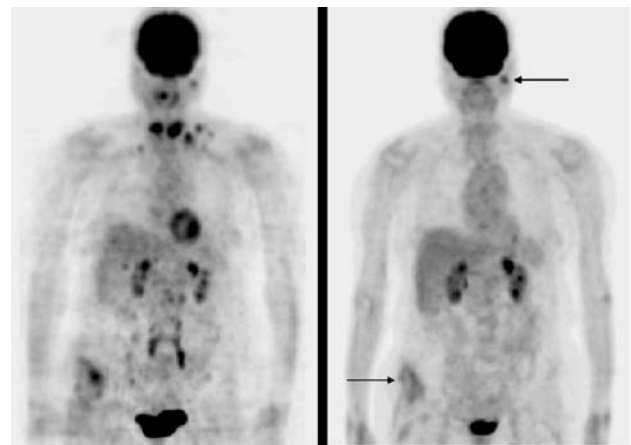
realizado inmediatamente después de finalizar el tratamiento.<sup>9-11</sup>

Algunos casos de regresión tumoral (linfoma, osteosarcoma, cáncer de mama y esófago) se relacionan con disminución en la intensidad de las imágenes. En otras neoplasias (carcinoma pulmonar), los cambios en la captación de 18-fluorodesoxiglucosa pueden encontrarse oportunamente para pronosticar la respuesta al tratamiento y modificarlo. Esto se aplica para la elección de agentes quimioterapéuticos, suficientemente activos, de tercera generación.<sup>12</sup>

#### Tumores de origen desconocido

##### Detección del tumor primario

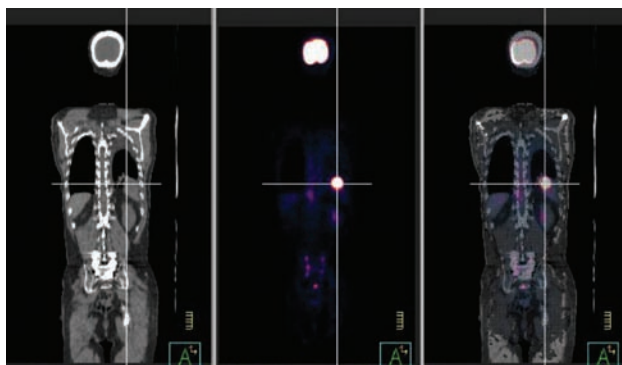
Los tumores de origen desconocido aparecen en 2 a 4% de los pacientes. El pronóstico y tratamiento se relaciona con enfermedades diseminadas, ya que las localizadas se enfocan en procedimientos curativos; los conceptos terapéuticos son los de mayor importancia. La tomografía por emisión de positrones detecta el tumor primario en algunos pacientes, pero la mayor parte de los estudios no ha determinado el efecto del tratamiento (figura 4). Los tumores primarios de origen desconocido se han detectado en 43% de la población.<sup>13</sup>



**Figura 4.** Hombre de 35 años de edad con linfoma de Hodgkin confirmado por el estudio histopatológico (biopsia del ganglio cervical izquierdo). La tomografía por emisión de positrones inicial (izquierda) mostró zonas hipermetabólicas en los ganglios cervicales, supraclaviculares, yugular izquierdo y mediastínicos anteriores e inguinal derecho. A la derecha se muestra el estudio después de la quimioterapia. Respuesta metabólica parcial: persistió la zona hipermetabólica moderada en el ganglio yugular e inguinal derecho (flechas negras). El paciente continuará con quimioterapia.

### Metástasis a distancia y tumores sincrónicos

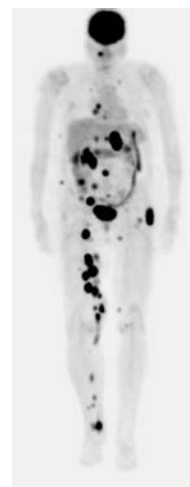
Se estima que 10% de los pacientes con tumores de la cabeza y el cuello desarrolla un segundo tumor primario (alrededor de 1% lo manifiesta en el tejido pulmonar). Dichos tumores, como las metástasis a distancia, tienen implicaciones importantes para el tratamiento. La tomografía por emisión de positrones es útil en estos casos, ya que los tumores primarios sincrónicos se han encontrado en 1 a 12% de los casos y las metástasis a distancia en 12 a 21% de los pacientes con tumores de la cabeza y el cuello. Esta técnica detecta las lesiones con menor exposición a la radiación (en comparación con la tomografía axial computada) y es más útil que la broncoscopia para localizar los tumores sincrónicos. En otros estudios se han detectado varias lesiones que no se lograron observar con el resto de los estudios de imagen; por lo tanto, influye directamente en el tratamiento de los pacientes. Cerca de 22% de los pacientes desarrolla un segundo tumor primario a los cinco años. Se considera que la tomografía por emisión de positrones es la mejor técnica para detectar este hallazgo (figura 5), pero aún no se realizan estudios para confirmarlo.<sup>14</sup>



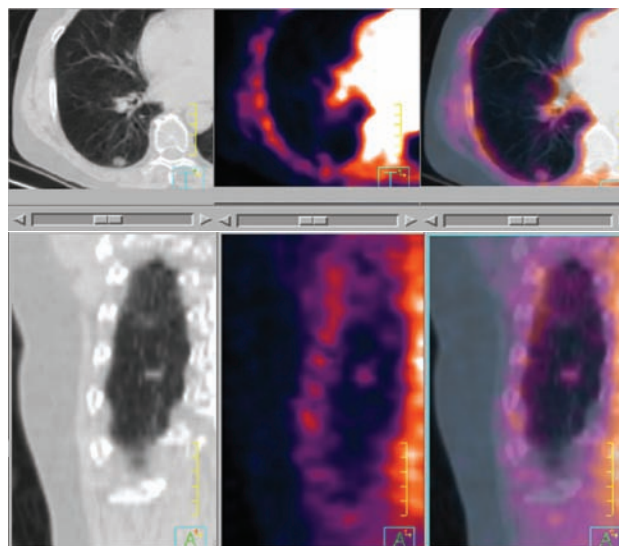
**Figura 5.** Paciente masculino de 67 años de edad con antecedentes heredofamiliares de dos hermanos fallecidos por carcinoma pulmonar. Padecimiento con una tumoración en la fosa iliaca izquierda. Se realizó la resección y el reporte comprobó un adenocarcinoma abdominal metastásico. La radiografía de tórax se reportó normal. Motivo del estudio PET/CT: tumor de origen desconocido. El estudio demostró una zona hipermetabólica en la base del lóbulo inferior del pulmón izquierdo que corresponde al tumor primario. Depósitos secundarios en la axila izquierda y los huesos. Los hallazgos secundarios fueron derrame pleural izquierdo y quiste renal ipsilateral. El paciente cambió del esquema quirúrgico a la quimioterapia.

### Evaluación de la viabilidad miocárdica

La insuficiencia ventricular izquierda y el síndrome de insuficiencia cardíaca siguen en aumento. Los pacien-



**Figura 6.** Hombre de 50 años de edad con diagnóstico de melanoma maligno en la zona anterior del tórax. Se realizaron estudios por emisión de positrones para establecer la estadificación. Hallazgos: se observaron zonas hipermetabólicas múltiples correspondientes a una afección maligna ganglionar diseminada.



**Figura 7.** Paciente masculino de 62 años de edad con antecedentes de tabaquismo (IT: 40 paq/año). En la exploración radiográfica de tórax se observó un nódulo pulmonar. Se envió para estudios PET/CT para diferenciación benigna o maligna. Hallazgos: se observó una zona hipermetabólica en el segmento posterior del lóbulo inferior derecho. La imagen de fusión mostró el nódulo hipodenso, compatible con una lesión maligna. Se realizó la biopsia y se estableció el diagnóstico de adenocarcinoma pulmonar.

tes con esta enfermedad tienen alto riesgo de muerte y calidad de vida disminuida. La insuficiencia ventricular izquierda resulta de un miocardio hibernante; éste se define como el músculo cardíaco con alteración fun-

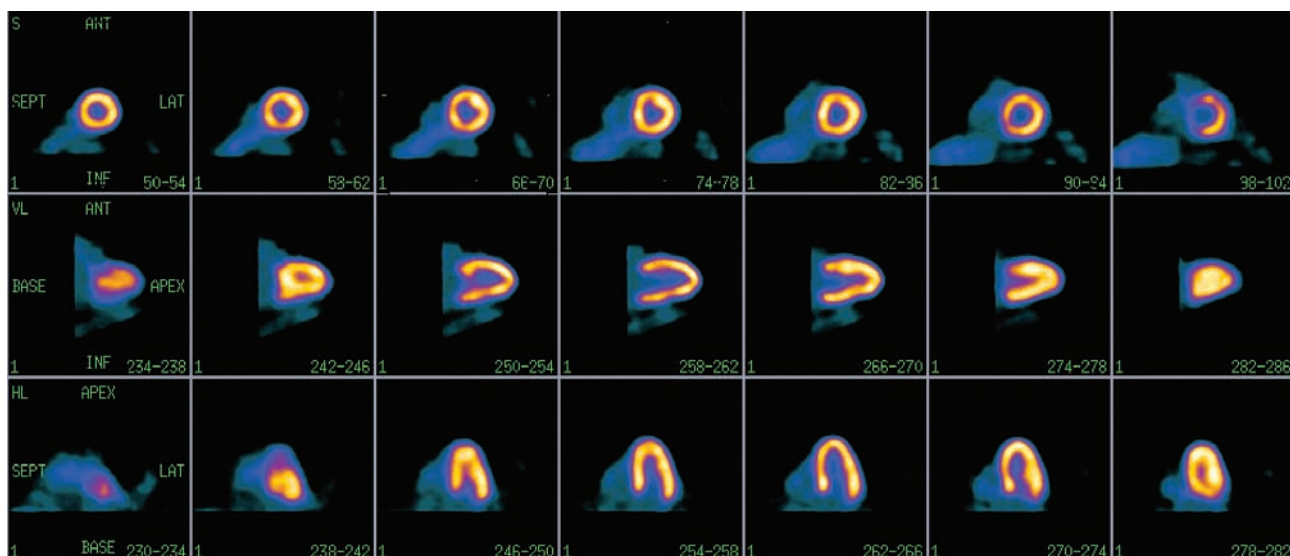
cional. Dicha afección se debe a la oclusión de alguna arteria coronaria o al miocardio dañado por oclusión coronaria transitoria. El daño miocárdico implica la restauración del flujo coronario, pero la función de contractilidad tarda en recuperarse.<sup>15</sup>

Los pacientes con daño sistólico son los de peor pronóstico. El estudio CASS (*Coronary Artery Surgery Study*), demostró una supervivencia de 90% para los pacientes con fracciones de eyección de 50% o más, en comparación con 30% de supervivencia para los que tuvieron fracciones de 35 a 49% o menores a 35% ( $p = 0.001$ ).<sup>16</sup>

La enfermedad coronaria es una de las principales causas de muerte en los países industrializados. En México fue la segunda causa de muerte en el 2003 y contribuyó con 50,757 de las defunciones totales. La tasa de mortalidad se estimó en 48.7 (10.8%).<sup>17</sup>

bles, se consideran de alto riesgo para sufrir isquemia. Estos individuos pueden mejorar con la revascularización, por lo que es importante identificar a los pacientes con dichas características. La centellografía miocárdica es un método excelente para este propósito. La tomografía por emisión de fotón único, con previa administración de talio-201, <sup>99m</sup>Tc-sestamibi o <sup>99m</sup>Tc-tetrofosmín, es una modalidad efectiva para identificar la viabilidad miocárdica, además de servir como guía de tratamiento.<sup>15</sup>

La tomografía por emisión de fotón único (miocárdica) ha sido constante desde hace dos decenios. Su sensibilidad para detectar las enfermedades multivasculares es alta (90 a 94%), pero esta misma es limitada (60 a 76%) para detectar la enfermedad de vaso único. En los casos de enfermedad trivascular difusa, disminuye la sensibilidad para detectar cada



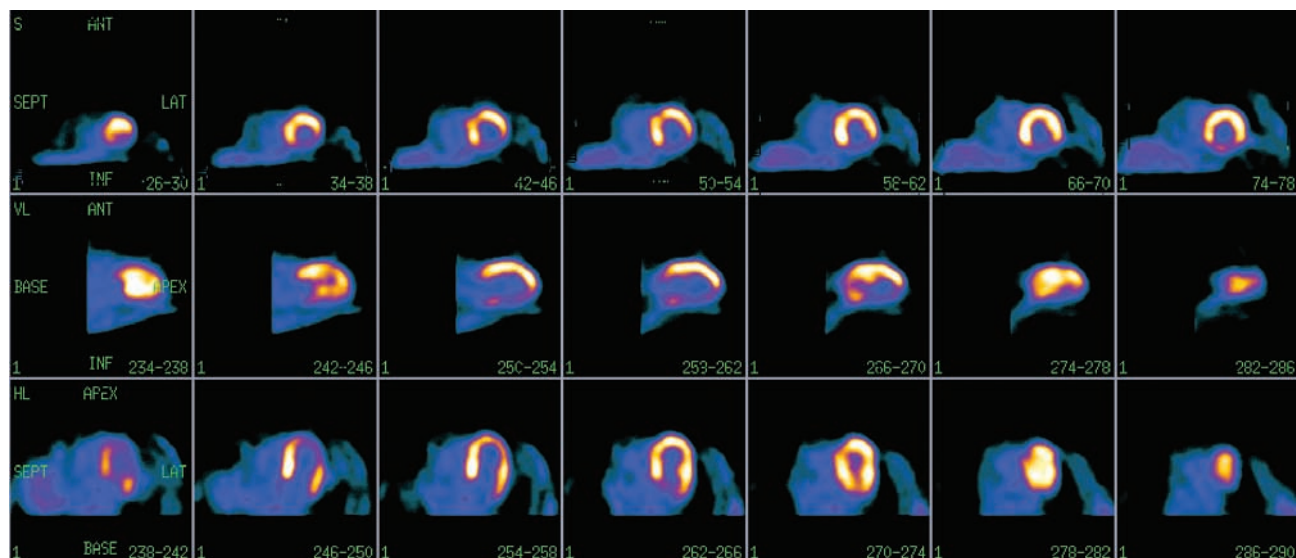
**Figura 8.** Mujer de 65 años de edad con antecedente de infarto del miocardio transmural de la pared inferior. Se realizó la tomografía por emisión de fotón único y demostró una zona de necrosis. Se efectuó la angiografía coronaria y después la revascularización cardiaca. Motivo del estudio: valorar la eficacia del tratamiento.

La enfermedad coronaria contribuye con dos terceras partes de los casos de insuficiencia cardiaca. La insuficiencia ventricular izquierda puede o no deberse a cicatriz irreversible, o ser secundaria a una alteración en la función y utilización de la energía por los miocitos viables (éstos permanecen funcionales en los casos de restablecimiento del flujo sanguíneo).

Los pacientes con alguna alteración funcional del ventrículo izquierdo y con miocardio con células via-

vaso, por lo que la “isquemia equilibrada” enmascara la enfermedad generalizada. Otra limitante se debe a la extracción incompleta de los radiotrazadores utilizados en la medicina nuclear convencional. Los problemas relacionados con la administración de radiotrazadores implica un periodo largo (horas) para obtener las imágenes.<sup>18</sup>

La tomografía por emisión de positrones mejora la información y es una herramienta poderosa para



**Figura 9.** Tomografía por emisión de positrones con metabolismo adecuado en las paredes ventriculares izquierdas. Viabilidad miocárdica normal. Mujer de 58 años de edad con antecedentes de tabaquismo y tres estudios previos de perfusión miocárdica normal. Tuvo un infarto en la pared inferior y se realizó la angiografía coronaria con angioplastia primaria; se colocó un *stent*. Motivo del estudio PET: valorar la viabilidad miocárdica. Las imágenes PET-FDG muestran, una vez generados el eje corto, los largos verticales y horizontal, los siguientes datos: 1) Necrosis en la pared inferior con escasa viabilidad miocárdica (probable región de la arteria coronaria derecha). 2) Resto de las paredes ventriculares con metabolismo adecuado de FDG.

pronosticar cuáles pacientes tendrán respuesta satisfactoria con la revascularización, incluidos los sometidos y candidatos a trasplante cardiaco.

Otras modalidades no invasivas, como la ecocardiografía con estrés, facilitan la evaluación de la viabilidad miocárdica; sin embargo, existen ventajas y desventajas comparadas con las técnicas nucleares. Las imágenes obtenidas por medicina nuclear requieren menor número de células viables para su detección. Esta modalidad tiene alta sensibilidad y poca especificidad para pronosticar la mejoría de la función ventricular (posrevascularización).<sup>15</sup>

El valor de la tomografía por emisión de positrones se demostró hace más de 20 años; sin embargo, su uso es mínimo debido a ciertas implicaciones: 1) contar con un ciclotrón, 2) costo del estudio, y 3) programas de cómputo insuficientes para procesar las imágenes cardiacas. Hasta hoy, cada uno de estos contratiempos ha disminuido.

Uno de los principales radiotrazadores para evaluar la perfusión miocárdica es el <sup>13</sup>N-amonio, cuya vida media es de 10 minutos. En el torrente sanguíneo es una partícula eléctricamente neutra

y está en equilibrio con su ión cargado  $\text{NH}_4^+$ . La molécula neutra  $\text{NH}_3$  pasa por difusión a través de la membrana celular. Una vez dentro de la célula adquiere su forma de amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) y se incorpora a la glutamina por medio de la enzima glutamina sintasa. A pesar de la difusión hacia fuera de la célula, la incorporación del <sup>13</sup>N-amonio es elevada durante el reposo y disminuye con el flujo sanguíneo alto. Las imágenes de los pacientes con metabolismo hepático elevado y con congestión pulmonar pueden resultar alteradas.

El oxígeno-15-agua es un radiotrazador que se utiliza en la investigación cuantitativa del flujo miocárdico. La capacidad del agua para penetrar libremente la membrana plasmática lo hace uno de los más utilizados para este propósito.

El Rubidio-82 (<sup>82</sup>Rb) tiene vida media de 75 segundos. Es un catión análogo del potasio y se extrae del plasma (por las células miocárdicas) mediante la bomba Na/K ATPasa. La extracción disminuye por tres factores: acidosis grave, hipoxia e isquemia; por lo tanto, su captación depende del flujo sanguíneo y de la integridad del miocito.<sup>18</sup>



En los pacientes con enfermedad coronaria, la evaluación de la perfusión miocárdica incluye la centellografía, ecocardiografía o resonancia magnética, como métodos no invasivos para establecer el diagnóstico. La perfusión miocárdica por centellografía y ecocardiografía con estrés proporcionan un pronóstico independiente en estos pacientes.

## REFERENCIAS

1. Phelps ME. Inaugural article: positron emission tomography provides molecular imaging of biological processes. *Proc Natl Acad Sci USA* 2000;97(16):9226-33.
2. Schwaiger M, Weber W. Functional imaging: from anatomy to molecular imaging. *Medica Mundi* 2002;46(1):2-10.
3. Brownell GL. A history of positron imaging [en línea]. 1999. Dirección URL: <<http://www.mit.edu/~glb/pethis.pdf>>.
4. Zanzonico P. Positron emission tomography: a review of basic principles, scanner design and performance, and current systems. *Semin Nucl Med* 2004;34(2):87-111.
5. Detterbeck F, Vansteenkiste JF, Morris DE, Dooms CA, et al. Seeking a home for a PET, part 3: emerging applications of positron emission tomography imaging in the management of patients with lung cancer. *Chest* 2004;126:1656-66.
6. Higashi K, Ueda Y, Arisaka Y, Sakuma T, et al. 18F-FDG uptake as a biologic prognostic factor for recurrence in patients with surgically resected non-small cell lung cancer. *J Nucl Med* 2002;43:39-45.
7. Vansteenkiste JF, Stroobants SG, Dupont PJ, De Leyn PR, et al. Prognostic importance of the standardized uptake value on (18)F-fluoro-2-deoxy-glucose-positron emission tomography scan in nonsmall-cell lung cancer: an analysis of 125 cases. Leuven Lung Cancer Group. *J Clin Oncol* 1999;17:3201-6.
8. Ahuja V, Coleman RE, Herndon J, Patz EF. The prognostic significance of fluorodeoxyglucose positron emission tomography imaging for patients with nonsmall cell lung carcinoma. *Cancer* 1998;83:918-24.
9. Schelling M, Avril N, Nahrig J, Kuhn W, et al. Positron emission tomography using [(18)F]Fluorodeoxyglucose for monitoring primary chemotherapy in breast cancer. *J Clin Oncol* 2000;18:1689-95.
10. Smith IC, Welch AE, Hutcheon AW, Millar ID, et al. Positron emission tomography using [(18)F]-fluorodeoxy-D-glucose to predict the pathologic response of breast cancer to primary chemotherapy. *J Clin Oncol* 2000;18:1676-88.
11. Wieder HA, Brucher BL, Zimmermann F, Becker K, et al. Time course of tumor metabolic activity during chemoradiotherapy of esophageal squamous cell carcinoma and response to treatment. *J Clin Oncol* 2004;22:900-8.
12. Jerusalem G, Hustinx R, Beguin Y, Fillet G. PET scan imaging in oncology. *Eur J Cancer* 2003;39:1525-34.
13. Rades D, Kuhnel G, Wildfang I, Borner AR, et al. Localised disease in cancer of unknown primary (CUP): the value of positron emission tomography (PET) for individual therapeutic management. *Ann Oncol* 2001;12:1605-9.
14. Hain SF. Positron emission tomography in cancer of the head and neck. *Br J Oral Maxillofac Surg* 2005;43:1-6.
15. Travin MI, Bergmann SR. Assessment of myocardial viability. *Semin Nucl Med* 2005;35:2-16.
16. Emond M, Mock MB, Davis KB, Fisher LD, et al. Long-term survival of medically treated patients in the Coronary Artery Surgery Study (CASS) registry. *Circulation* 1994;90:2645-57.
17. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. Base de datos de defunciones INEGI/Secretaría de Salud. Dirección General de Información en Salud. SINAIS, 2003. Dirección URL: <[http://sinais.salud.gob.mx/mortalidad/2003/mortalidad\\_c05\\_2003.xls](http://sinais.salud.gob.mx/mortalidad/2003/mortalidad_c05_2003.xls)>
18. Machac J. Cardiac positron emission tomography imaging. *Semin Nucl Med* 2005;35:17-36.