

Médica Sur

Volumen 12
Volume

Número 1
Number

Enero-Marzo 2005
January-March

Artículo:

Nuevas modalidades de imagen: PET-CT

Derechos reservados, Copyright © 2005:
Médica Sur Sociedad de Médicos, AC.

**Otras secciones de
este sitio:**

-  [Índice de este número](#)
-  [Más revistas](#)
-  [Búsqueda](#)

***Others sections in
this web site:***

-  [Contents of this number](#)
-  [More journals](#)
-  [Search](#)



www.Medigraphic.com

Nuevas modalidades de imagen: PET-CT

Iván Fabricio Vega-González,* Dra. Alicia Graef Sánchez,* Juan Carlos García-Reyna,* Mario Ornelas Arrieta**

Resumen

Dentro de la nueva tendencia observada en el mundo, de fusionar las imágenes metabólicas realizadas con la tomografía por emisión de positrones (PET), con las imágenes morfológicas, realizadas por la tomografía computarizada (TC), el propósito de esta revisión es aclarar los términos utilizados en esta nueva modalidad de imagen, describir el funcionamiento de este nuevo equipo de apoyo diagnóstico, así como enumerar las indicaciones de estos estudios.

Palabras clave: Imágenes metabólicas, imágenes morfológicas, PET, TC.

Introducción

A pesar de que los avances tecnológicos son cada día más sofisticados y que parece no existir un límite en lo que el ser humano pueda lograr, en cuanto a mejorar la calidad de vida, el cáncer continúa siendo un gran problema de salud pública en todo el mundo.

En México las estadísticas de la Secretaría de Salud del año 2001 muestran que los tumores malignos ocupan el segundo lugar de mortalidad, después de las enfermedades del corazón, y al parecer no hay cambios en los años subsecuentes.¹

El diagnóstico por imagen es un apoyo más con el que cuenta el clínico al tener un paciente con cáncer y se vuelve imprescindible hoy día debido a que la tendencia en la medicina es realizar la menor cantidad de procedimientos invasivos y porque debemos hacer una medicina basada en las evidencias.

Los estudios morfológicos realizados por radiología: Rayos X (RX), el ultrasonido (US), resonancia magnética (RM) o la tomografía computarizada (TC), cada uno con sus indicaciones específicas, han tenido desde siempre gran trascendencia en el manejo de pacientes con cáncer; sin embargo ninguno de ellos es capaz de determinar la actividad metabólica de un órgano o tumor, ya sea en el diagnóstico inicial, en la respuesta a la terapia, en la etapa posquirúrgica o en el seguimiento a largo plazo.

Abstract

On the new world tendency about making a fusion between metabolic images acquired by Positron emission tomography (PET) and morphologic images obtained by computer tomography (CT), the purpose of this review is to explain the terms using in this new imaging modality, describe the performance of this new diagnosis equipment and enumerate the indications of a PET-CT scan.

Key words: Metabolic images, morphologic images, PET-CT.

Por otra parte los estudios de medicina nuclear, ya sea gammagrafía o la tomografía por emisión de positrones (PET), se han caracterizado desde siempre por valorar la fisiología, función y el metabolismo de los órganos; no obstante el gran problema de estos estudios siendo el mismo, adolecen de una correlación anatómica adecuada.

La fusión de las imágenes en un equipo PET-CT, es probablemente la respuesta a los problemas que tienen la radiología en definir el metabolismo de un órgano o tumor y de la medicina nuclear en determinar la morfología y localización exacta de un órgano o de una tumoración.

Realización de un estudio PET-CT, bases físico-químicas

Debemos definir algunos términos con el fin de entender el funcionamiento, aplicaciones y limitaciones del método.

Para realizar un rastreo PET-CT a un paciente, se debe aplicar un radiofármaco, este **radiofármaco** es la unión de un fármaco y un átomo radiactivo emisor de positrones.

Los fármacos usados en la imagen de PET son generalmente elementos o sustancia fisiológicas, que son incorporadas en las vías metabólicas correspondientes, como por ejemplo el carbono, oxígeno, aminoácidos o glucosa. Es precisamente un derivado de la glucosa, la flúor desoxiglucosa (**FDG**) el fármaco más utilizado en el mundo para imágenes PET-CT, ya que como veremos más adelante, penetra en la vía metabólica de degradación de la glucosa de la misma manera en que lo hace esta molécula, y aunque al final no se degrada, queda

* Departamento de Medicina Nuclear. Hospital "Médica Sur".

** Servicio de Medicina Nuclear, Instituto Mexicano del Seguro Social. Nacional Siglo XXI. México, D.F.

dentro de la célula, demostrando el consumo de glucosa por la misma, es decir el metabolismo.²

Un átomo se considera como radiactivo cuando tiene dentro del núcleo un exceso de energía o de masa (en forma de neutrones o protones).

Así, un átomo con exceso de energía en su núcleo, libera esa energía en forma de fotones *gamma*, (utilizados para *gammagrafía*) y un átomo con exceso de protones en su núcleo, libera estas partículas en forma de *positrones*, ambos son liberados con el fin de encontrar su estabilidad atómica, es decir buscando el balance entre las masas y las energías del núcleo.³

Lo que sucede a continuación es que la partícula liberada, que está cargada positivamente llamada positrón, choca por atracción de cargas con un electrón de un orbital de un átomo cercano y se produce un aniquilamiento de ambas partículas, desapareciendo la masa, pero creando 2 fotones de energía que salen proyectados cada uno con dirección opuesta, con 180° de diferencia uno del otro. Estos fotones son los que van a ser detectados por el equipo PET.³

Como es difícil encontrar en la naturaleza átomos radiactivos emisores de positrones puros, en 1938 Ernest Ornado Lawrence desarrolló el primer ciclotrón. En este aparato un átomo llamado incidente, es acelerado en forma circular hasta que alcanza cierta velocidad, y es entonces impactado contra otro átomo llamado blanco. Lo que se logra con este proceso es que el núcleo del átomo blanco reciba del átomo incidente un exceso de energía y de masa en forma de protones en el núcleo.⁴

Como el átomo blanco recibió los protones en su núcleo, cambian su masa y su peso y por ende cambia su número atómico, quedando con las características físicas de otro átomo diferente, pero además del exceso de masa en forma de cargas positivas queda con un exceso de energía. Éstas, la masa y la energía van siendo liberadas en forma de *positrones*. Por ejemplo el H2 es acelerado en un ciclotrón y es impactado contra un átomo de O16; el hidrógeno “cede” sus protones al oxígeno, quedando convertido en nuevo átomo, pero radiactivo, por el exceso de energía y de 2 protones, llamado el flúor 18 o F18.⁵

Otra forma de producir átomos emisores de positrones es por medio de generadores de isótopos, es decir se utiliza un proceso encontrado en la naturaleza en el cual un átomo radiactivo, al perder masa y energía queda convertido en otro átomo radiactivo, con características diferentes. Esta técnica ha resultado ser muy costosa por la escasez con que se produce este fenómeno en la naturaleza.

La vida media, se define con el tiempo que tarda la actividad de una muestra de átomos radiactivos en lle-

gar a la mitad de la actividad inicial. Por ejemplo si tenemos 100 milicurios (mCi) de F18, exactamente 110 minutos después tendremos 50 mCi, ya que la vida media de F18 es de 110 minutos, que es relativamente larga y por eso es el átomo emisor de positrones más utilizado hoy día. Existe una vida media característica para cada átomo radiactivo.⁶

La vida media de algunos de los átomos emisores de positrones de uso clínico es de minutos, por lo tanto su aplicación se limita a los centros en donde se cuenta con un ciclotrón al lado del equipo PET.

La unión entre un átomo emisor de positrones y de una molécula para formar un **radiofármaco**, se realiza en laboratorios de radiofarmacia con las debidas medidas de seguridad radiológica y biológico-infecciosas.

El radiofármaco más usado en el mundo para realización de estudios PET es el FDG-F18.

Funcionamiento del sistema PET

Cada aparato PET posee una serie de detectores que no son otra cosa que cristales de centelleo. Estos cristales están distribuidos en forma circular alrededor del espacio central del aparato destinado para el paciente. Algunos equipos poseen hasta 24,000 cristales (Biograf, Siemens®), que son exactamente 24,000 detectores, los cuales a su vez están alineados en 2, 3 ó hasta 4 anillos.

Todos aquellos fotones que se producen al realizarse el aniquilamiento de los positrones y que se dirigen en dirección opuesta con 180° de diferencia uno del otro, van a ser detectados por un par de cristales o detectores situados uno exactamente al frente del otro, el equipo registra este evento como un evento coincidente e incorpora esta información como parte de la que se va a utilizar para la formación de la imagen. Se necesitan muchos millones de eventos coincidentes para que se pueda formar una imagen.

La luz producida por el evento de **centelleo**, que es la interacción del fotón con el cristal, es convertida por un fotocatodo en electricidad y a esta pequeña carga de electricidad se le aplican diferencia de potenciales eléctricos dentro de los llamados “tubos fotomultiplicadores”, de los que hay para cada detector, con el fin de aumentar la débil carga eléctrica hasta que llegue a ser una señal que pueda ser transformada por el sistema analógico a digital en imagen. Cada vez que un par de fotones producen un centelleo coincidente y luego son convertidos de información eléctrica a información digital en imagen, el equipo los registra con el nombre de “una cuenta”.

Como los centelleos que son las señales eléctricas que se llaman cuentas, provienen de diferentes ángulos del

Nuevas modalidades de imagen: PET-CT

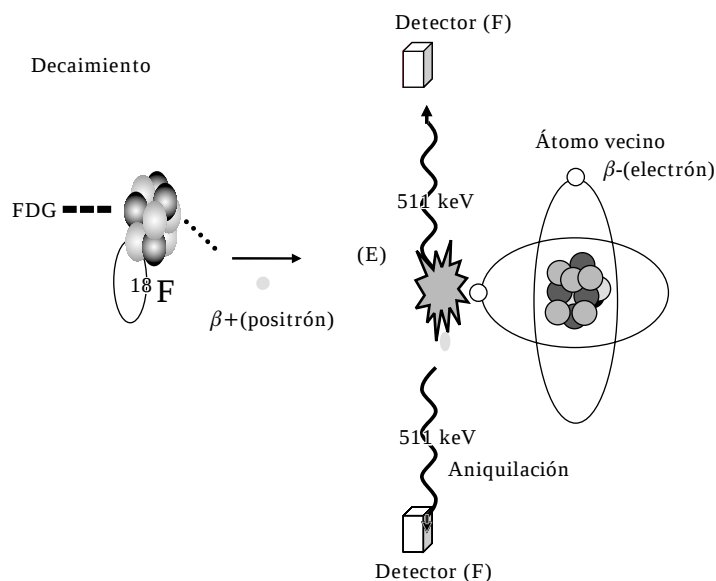
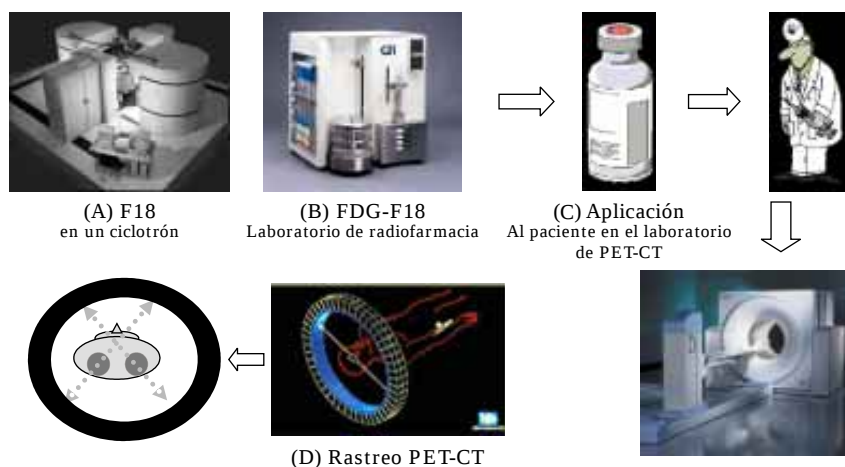


Figura 1. Esquema de la secuencia de eventos que se producen desde que el F18 es producido en el ciclotrón (A), adicionado a la molécula de FDG en el laboratorio de radiofarmacia (B), inyectado al paciente (C), realizado el rastreo PET-CT, en un equipo con múltiples detectores, Siemens Biograf® (D) y la manera como se produce el aniquilamiento del positrón con el electrón (E) y la detección simultánea de los fotones de 511 KeV de energía cada uno, por un par de cristales del equipo PET (F).

cuerpo, al ser sumadas y luego reconstruidas en 3 dimensiones nos permiten obtener cortes tomográficos axial, coronal y sagital de todas las regiones del cuerpo si el rastreo ha sido corporal total o se pueden obtener los mismo cortes de un área en particular si el rastreo ha sido de un segmento del cuerpo (Figura 1).⁷

Inconvenientes técnicos de la detección

Las imágenes formadas en los equipos PET presentan el inconveniente de que los tejidos del cuerpo pueden atenuar o disminuir o incluso retrasar la llegada de uno de los dos fotones resultantes del aniquilamiento del positrón con el electrón. Es decir uno de los dos fotones tendrá que recorrer mayor distancia, dentro de los tejidos del cuerpo, antes de llegar al cristal para producir el centelleo, a esto se le llama **ate-**

nuación de tejidos y es tan importante que puede producir una pérdida de hasta 50% de los eventos de centelleo, ya que aunque son coincidentes, por llegar con una diferencia de tiempo mayor de 12 nanosegundos, el equipo los considera no coincidentes, disminuyendo así las cuentas adquiridas y por consiguiente la calidad de la imagen.

Para disminuir esta pérdida de eventos, los equipos PET utilizan el llamado sistema de *emisión-transmisión*. Los equipos PET tienen una fuente radiactiva, que es generalmente de germanio 68, localizada alrededor del espacio destinado para el paciente; cuando el paciente es colocado en posición se abre la ventana de detección de radiación para esa fuente de Ge 68, de modo que los detectores que están del otro lado del paciente reciben la radiación, calculando automáticamente el espesor de los tejidos al tomar en cuenta el

tiempo de la emisión de la radiación contra el tiempo de llegada de la misma al detector después de atravesar el cuerpo, es decir se calcula la atenuación de la radiación. Estos datos corrigen los tiempos de detección para cada una de las áreas del cuerpo y a este proceso se le llama **emisión**. Inmediatamente se realiza el proceso de la **transmisión**, que no es otra cosa que el registro de la propia actividad radiactiva emitida por el radiofármaco desde el cuerpo de paciente, pero con los tiempos ya corregidos por el cálculo realizado en la fase de emisión.⁸

Los tiempos de estos procesos dependen de la cantidad de cristales y de anillos del aparato, en promedio, la emisión y la transmisión pueden tardar entre 3 a 4 minutos cada uno, lo que quiere decir 7 a 8 minutos por región. Si tenemos un paciente con una estatura de 1.70 m, se requiere realizar un rastreo en 5 ó 6 regiones, el tiempo total del rastreo será de 40 a 50 minutos.

Al tener un equipo PET-CT, todo el proceso se realiza tomando los datos de atenuación de tejidos directamente del rastreo por CT realizado antes del rastreo PET. El tiempo de este rastreo con CT dependerá del número de cortes del tomógrafo. En un equipo CT multicorte de 16, el rastreo corporal **total** se realiza entre 1.5 a 3 minutos, lo que representa una disminución de cerca del 50% del tiempo es decir a 25 a 30 minutos por rastreo.

Si el equipo PET posee además varios anillos, un mayor número de cristales y esos cristales poseen una gran sensibilidad los tiempos van disminuyendo. Por ejemplo en el equipo PET-CT Siemens Biograf®, que tiene un CT multicorte de 16 y un equipo PET con 24,000 cristales de centelleo LSO (ortosilicato de lutecio, considerado el cristal más eficiente), en una disposición de cristales en 4 anillos. Se puede realizar un rastreo PET-CT en un paciente de 1.7 m de altura en aproximadamente 15 a 20 minutos.⁸

Fusión PET-CT

Desde 1991 en Pisa Italia, Pisani y colaboradores describieron el primer sistema de computadora para sobreponer las imágenes de medicina nuclear con imágenes de TC.

Estos sistemas sobreponían las imágenes de un método de diagnóstico con otro, usando marcas físicas extrínsecas al cuerpo para realizar la alineación de las imágenes. Con lo anterior se logró mejorar el diagnóstico de los estudios de medicina nuclear y PET, ya que de alguna manera se logró tener una mejor idea de la morfología. A pesar de ello los procedimientos de superposición de imágenes eran muy dispendiosos con persistencia de errores

que incluso resultaban en no definir puntos tan distantes como 2 cm, en imágenes abdominales.

Los problemas con esta superposición se debe a que las imágenes son adquiridas en tiempos, procedimientos, matrices y con equipos diferentes, teniendo que utilizar además, otro sistema de computadora para realizar la superposición, la cual generalmente se hacía en manos del especialista o técnico, incrementando la posibilidad de error por ser operador dependiente.⁹

Una vez se logra obtener el primer equipo SPECT-CT, es decir un equipo de medicina nuclear con CT incluida, en el que sin embargo la CT sólo servía de referencia anatómica, se abren las bases para el desarrollo del PET-CT.

Los equipos fusionados de PET-CT que existen hoy día, permiten la realización de los dos estudios en un mismo tiempo, limitando el error por movimiento, realizando una verdadera fusión intrínseca de imágenes, sin la intervención del error humano, por ser operador independiente, logrando una verdadera integración de imágenes morfológicas y metabólicas adquiridas en diferentes matrices.

La corrección de atenuación, descrita en párrafos anteriores, es tal vez el mejor aporte, desde el punto de vista técnico, que le hace la TC al PET, disminuyendo el tiempo de los estudios y aumentando su resolución.

Por otra parte existen varios puntos de valor agregado cuando se cuenta con un equipo de imágenes fusionadas PET-CT: La realización de un solo procedimiento al paciente, lo cual hace que el estudio sea confortable y rápido. La adquisición de un estudio concomitante de una de alta calidad, como es un rastreo de CT, el cual en muchos casos es multicorte incrementando la sensibilidad y exactitud diagnósticas. Y por último la integración de diferentes disciplinas en el diagnóstico, es decir medicina nuclear, radiología, oncología, radioterapia, neurología, cardiología etc. hace que los diagnósticos tengan la claridad de la fusión de las especialidades y de los propios especialistas¹⁰ (Figuras 2 y 3).

Aplicaciones clínicas

Antes de describir las indicaciones de los estudios PET-CT, se deben revisar ciertos aspectos que pueden llegar a alterar de alguna manera el resultado de la interpretación de las imágenes como son: El metabolismo celular tumoral y su relación con el metabolismo de la FDG-F18, la metodología PET empleada para cuantificar el estado metabólico de un área, la preparación de un paciente que va ser llevado a un rastreo PET-CT, las técnicas de realización del PET y el CT y la normalidad en la distribución de la FDG-F18.

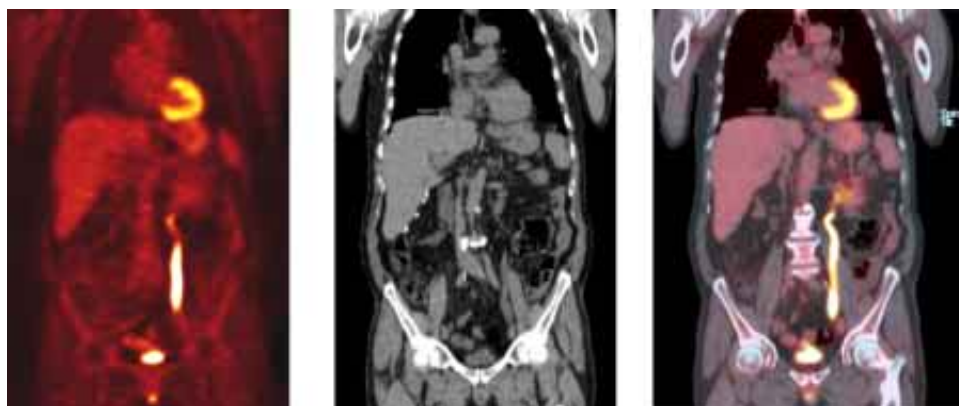


Figura 2. A la izquierda, corte coronal de la región toracoabdominal de un rastreo PET, en donde se observa la distribución normal del FDG-F18, en el centro el corte correspondiente de la CT multicorte y a la derecha la imagen de fusión PET-CT. Cortesía de Siemens Medical System.

Metabolismo celular tumoral y el F18-FDG

Dentro del proceso de la génesis y del crecimiento tumoral intervienen muchos factores que estimulan la proliferación celular, con el consiguiente aumento de actividad metabólica, como son el factor de crecimiento derivado de plaquetas (PDGF) y otros factores de crecimiento. Así mismo también actúan los factores que estimulan la angiogénesis, como el factor de crecimiento endotelial (VEGF) y el factor del crecimiento de fibroblastos.

Todos estos procesos son dependientes del consumo de la glucosa.

La glucosa es incorporada a las células tumorales por transporte facilitado por los transportadores de la glucosa (GLUT). Una vez que la glucosa es incorporada dentro de la célula tumoral, se inicia el proceso de la glicólisis, para su transformación en piruvato bajo condiciones aerobias.

Como ya se describió anteriormente la FDG es considerada una molécula análoga de la glucosa, por supuesto es incorporada al proceso metabólico de las células tumorales siguiendo la misma secuencia de éstas.

El aspecto más importante de esta analogía es que la incorporación y el metabolismo de la FDG dentro de las células tumorales es directamente proporcional a la incorporación y el metabolismo de la glucosa por las células tumorales y por ende es directamente proporcional a su actividad metabólica.

La FDG experimenta fosforilación para formar FDG-6-fosfato; sin embargo, no continúa la vía metabólica, quedando atrapada dentro de las células tumorales.

Es por esta razón que la FDG sirve como fármaco de valoración del metabolismo celular tumoral y se convierte en radiofármaco al adicionarle un átomo emisor de positrones, el F18.¹¹

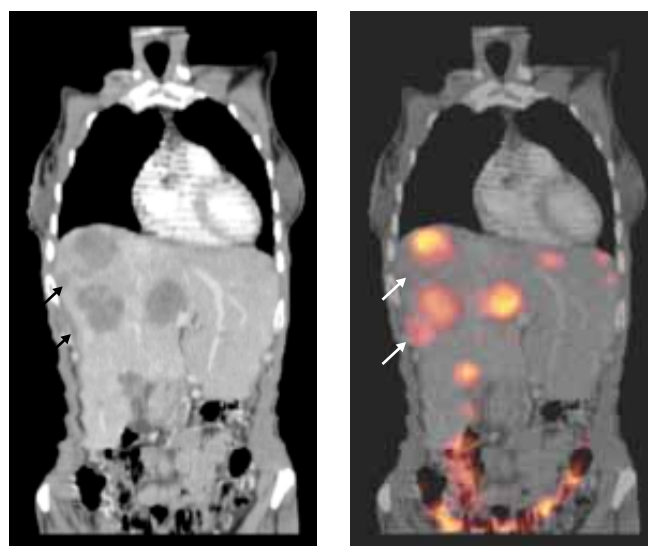


Figura 3. A la izquierda, corte coronal de la región toracoabdominal de un rastreo CT multicorte, en donde se observan múltiples áreas hipodensas en el hígado, en una mujer de 42 años. A la derecha, imagen PET-CT de la misma localización en donde es evidente que algunas zonas hipodensas, demostradas por CT, no presentan actividad metabólica anormal, demostrada por la imagen PET fusionada y por el contrario otras zonas de tejido “aparentemente” normal presentan actividad metabólica anormal. Data Courtesy of University Hospital Essen.

Estimación de la actividad metabólica celular por PET

Una de las ventajas del estudio PET es que se puede realizar una valoración semicuantitativa de la cantidad de radiofármaco existente en un área de tejido determinado mediante los sistemas de cómputo de procesamiento de las imágenes, lo anterior quiere decir que si existe un área sospechosa de tener mayor concentración de radiofármaco que el tejido anexo y le pedimos al sistema que cuantifique esa área nos dará

la información en unidades llamadas "SUV"; estas unidades llamadas unidades estandarizadas de valor, se obtienen de un cálculo que realiza el sistema de la siguiente manera: $SUV = \text{actividad del trazador en el tejido (en microcuries por gramo de tejido)} / \text{dosis del trazador inyectado (en milicuries) por el peso del paciente en gramos}$.

Debido a que cuando se registran los datos del paciente el equipo solicita su peso y la dosis administrada en milicuries.

De acuerdo con lo anterior se han podido crear tablas de captación normal y para los diferentes órganos. Partiendo de estas tablas se ha podido establecer que los tumores malignos poseen un SUV mayor de 2.5-3.0, mientras que otros tejidos como la médula ósea o el pulmón tienen SUVs entre 0.5 a 2.5.

Estas unidades SUV son útiles si se requiere establecer una diferencia entre una lesión hipermetabólica maligna o una lesión hipermetabólica inflamatoria. Pero su punto de uso máximo radica en poder establecer, mediante una disminución a un aumento de sus unidades, si una lesión está o no respondiendo a la terapia.¹²

Técnica de adquisición del estudio PET

La administración IV de un análogo de la glucosa como es el FDG-F18 obliga a preparar al paciente de tal manera que los niveles sanguíneos de ésta y los niveles de insulina no alteren su distribución o captación normal en los tejidos.

Debido a lo anterior se realiza una serie de recomendaciones a los pacientes, con el fin de evitar cambios en el metabolismo de la glucosa, entre los cuales están: Evitar desde 24 horas antes los ejercicios físicos; se debe mantener un ayuno de entre 4 a 6 horas antes del estudio, siendo esto necesario para aumentar la captación de FDG-F18 por las células tumorales y disminuir los propios niveles de glucosa, que pueden competir con los niveles de FDG-F18 al ser incorporados en las células tumorales y por otra parte para disminuir al máximo la captación por el corazón.

Los niveles sanguíneos de glucosa deben estar por debajo de 150 mg/dL, para lograr una adecuada captación después de aplicada la FDG-F18. Por eso estos niveles deben ser medidos antes de la aplicación del radiofármaco en todos los pacientes pero especialmente en los diabéticos.

La aplicación de insulina en pacientes diabéticos o con niveles de glucemia por arriba de 150 mg/dL aún no ha sido bien determinada. Esta administración de insulina para controlar los niveles de glucosa sanguí-

nea en los pacientes diabéticos puede incrementar la captación de FDG-F18 en algunos tejidos blandos y músculos de una manera exagerada.

La administración IV de la dosis de 10 mCi de FDG-F18 debe realizarse en un ambiente tranquilo y relajado. Con el fin de reducir al mínimo la captación muscular y cerebral (especialmente en los centros del habla y visual) de la FDG-F18, el paciente debe permanecer sin actividad, sin hablar e idealmente en una habitación con luz tenue por lo menos hasta durante 30 minutos después de la inyección del radioisótopo. Aproximadamente entre 45 a 60 minutos después de la aplicación del radiofármaco se inicia la adquisición del rastreo PET-CT.

Con el fin de determinar si la captación del FDG-F18 en algunas áreas corresponde a una concentración anormal o a una eliminación fisiológica del mismo, eventualmente se necesitan tomar imágenes tardías, con canalización de la uretra con sondas o posaplicación de diuréticos.¹³

Técnica del CT

La unión de la técnica PET con la CT obliga a que los especialistas de imagen, radiólogo y médico nuclear, conozcan cada uno la técnica del otro sistema.

Favoreciendo la unión entre medicina nuclear y radiología los equipos PET-CT han pasado de tener una CT helicoidal de un solo corte, es decir que realizar un solo corte axial del cuerpo a la vez, a acompañarse de TC multicorte de 6, 8, 12, 16, 32 y hoy día hasta 64 cortes, que son obviamente mucho más rápidas y con mayores aplicaciones clínicas. Lo anterior ha hecho que los equipos sean utilizados por los radiólogos para otros estudios diferentes, aparte de la técnica PET-CT.

El rastreo CT es lo primero que se realiza, previa administración de medio de contraste vía oral, después se adquiere el rastreo PET y por último, de acuerdo con las nuevas tendencias es tomar otro rastreo tomográfico previa administración de contraste IV.

El medio de contraste IV debe ser administrado antes de adquirir las imágenes del rastreo PET, ya que eventualmente puede producir artefactos en la imagen de PET. Sin embargo, hay evidencia reciente que aplicando algoritmos especiales a la imagen del PET, se podría obviar lo anterior, logrando aplicar doble contraste para el rastreo CT.¹⁴

Biodistribución normal de FDG-F18

Es necesario conocer cómo es la distribución normal de la FDG-F18, así como sus vías de eliminación, para poder detectar las anomalías.

En un rastreo corporal PET realizado 1 a 2 horas después de aplicar el FDG-F18 vía IV, se observa gran concentración de este radiofármaco en el cerebro, corazón y en la vejiga urinaria. Es lógico que por ser un órgano cuyo metabolismo está basado exclusivamente en la glucosa, sea el cerebro en donde exista la mayor cantidad del trazador. Esta acumulación cerebral de FDG-F18 se produce en la materia gris, tanto en las áreas supratentoriales como en las infratentoriales.

Si no hay ayuno existe una captación de FDG-F18 en el miocardio, de una manera similar a como es captado por el cerebro. Sin embargo, en estados de ayunos prolongados las células cardíacas desvían su metabolismo a bases de ácidos grasos, produciendo que la captación en el miocardio sea indistinguible de la actividad circulante en los vasos sanguíneos.

El FDG-F18 sigue una ruta de eliminación vía urinaria y en ausencia de hiperhidratación, aplicación de diurético o de una sonda vesical, el radiofármaco se acumulará en la vejiga urinaria.

Cualquier órgano cuyos niveles de concentración del radiofármaco se encuentren por arriba de los niveles circulantes del mismo en los vasos sanguíneos, podrá ser distinguido en una imagen. Debido a su alta tasa metabólica el hígado y el bazo presentan una captación del mayor que los niveles sanguíneos del radiofármaco. En el abdomen se pueden distinguir las siluetas renales y su eliminación a las pelvículas y ureteres para su acumulación posterior en la vejiga. Por otra parte puede existir normalmente una captación incrementada en la pared gástrica y en varias áreas del intestino. En el páncreas sin patología normalmente no hay captación del FDG-F18. La médula ósea, en todas sus localizaciones, es otra zona de aumento de concentración del radiofármaco, así se puede observar una captación difusa y homogénea en los cuerpos vertebrales, la pelvis y el esternón.

La captación por el tejido linfático del cuello, frecuentemente es debido a tonsilitis palatina. Frecuentemente se observan en el cuello captación tiroidea y de los músculos laríngeos, siendo normales. Se debe tener precaución con la captación incrementada en las mamas y en el útero, debido a cambios hormonales normales del ciclo menstrual¹⁶ (Figura 4).

Indicaciones clínicas de los estudios PET-CT

La utilidad del diagnóstico por imagen con los estudios PET-CT está muy bien establecida el día de hoy. Las aplicaciones oncológicas ocupan cerca del 90% de los estudios realizados por PET-CT, correspondiéndole

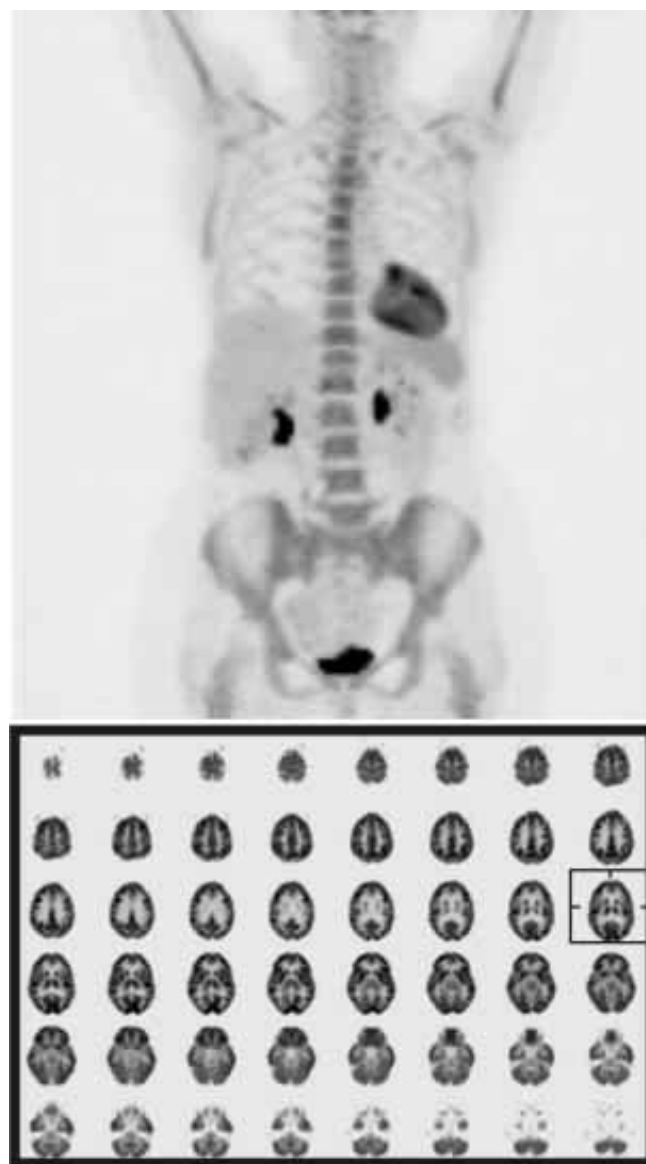


Figura 4. Arriba, biodistribución normal de la FDG-F18, aproximadamente 60 minutos después de su aplicación IV. Abajo, corte tomográfico axial de la distribución normal del mismo radiofármaco en el tejido cerebral. Imágenes cortesía de la Universidad de Michigan.

aproximadamente un 4 a 5% a las aplicaciones neurológicas, un 2 a 3% a las aplicaciones cardiológicas y de un 1 a 2% a la búsqueda de procesos inflamatorios.

La disponibilidad, vida media y la fácil manera de usar la FDG-F18, así como la manera de metabolizarse y de biodistribuirse en el cuerpo humano, son los factores que han convertido a este radiofármaco en el más utilizado para estudios PET y PET-CT y que a su vez ha convertido a la oncología en la primera de sus

indicaciones. El tejido maligno tiene una concentración mayor de FDG-F18 que el tejido sano anexo, y es este contraste de concentraciones, determinado de manera visual o por medio de las valoraciones de SUV, lo que hace el diagnóstico de anormalidad oncológica en las imágenes PET-CT.

Con la asociación de la TC multicorte al rastreo PET, produjo un incremento en las indicaciones oncológicas del propio PET ya que, aunque con los nuevos equipos PET se ha logrado una resolución que es capaz de encontrar lesiones con aumento de captación de la FDG-F18 de hasta 5 mm, es obvio que con la resolución de la TC multicorte de hasta 0.5 mm, se pueden localizar lesiones indetectables por PET, lo que hace la combinación PET-CT el estudio de imagen más sensible en oncología. Como se escribió anteriormente el valor agregado del PET-CT son las localizaciones anatómicas precisas de las lesiones, de sus tejidos anexos, como vasos sanguíneos o ganglios linfáticos, convirtiéndose el método en el mejor aliado del cirujano oncológico y del propio radioterapeuta.¹⁷

Los estudios neurológicos ocupan el segundo lugar en las aplicaciones de los estudios PET-CT. Si bien es cierto existe una excelente concentración del FDG-F18 en la sustancia gris del cerebro, es precisamente esa captación "elevada" la que en ocasiones impide la correcta determinación de los contrastes entre la concentración del radiofármaco por el tejido normal y la concentración del mismo por el tejido anómalo, aun con medición de SUV, sobre todo en los procesos posquirúrgicos o posradiación.

Sin embargo, el estudio PET-CT cerebral es de gran utilidad en la valoración de otros padecimientos neurológicos y psiquiátricos, que serán descritos adelante, como el Alzheimer, Parkinson, síndromes convulsivos, depresiones.¹⁸

Los átomos emisores de positrones ideales para ser usados combinados con fármacos que nos permitan valorar la perfusión del músculo cardíaco por PET son: el rubidio 82 con una vida media de 76 segundos, el O15 con una vida media de 110 segundos, el potasio 38 con una vida media de 7.6 minutos, el nitrógeno 13 con una vida media de 10 minutos y el carbono 11 con una vida media de 20 minutos; todos excepto el rubidio 82, que es producido por un generador, son producto de un ciclotrón.

Se debe notar que la vida media de estos átomos radiactivos es extremadamente corta, lo que quiere decir que si no se cuenta con un ciclotrón al lado del equipo PET-CT, no es posible realizar los estudios cardíacos de perfusión.

El tener un generador de rubidio 82 podría ser la solución para realizar estudios de perfusión miocárdi-

ca por PET en centros en donde no se cuenta con el ciclotrón. Por ahora en México los costos de importación de un generador de rubidio 82, son muy altos, pero aprovechando esta nueva tecnología y sabiendo que los estudios de perfusión cardíaca por PET son considerados como estándar de oro en imagen, se tiene que considerar esta opción.

Otra muy importante indicación de un estudio PET para corazón es la viabilidad miocárdica posinfarto, en donde también es considerado el estudio estándar de oro por imagen. No hay inconvenientes con el radiofármaco ya que es el mismo FDG-F18. Estos estudios se describirán adelante.²⁰

Existen otras indicaciones de un estudio PET-CT de corazón que se refieren a los estudios que se realizan con la TC multicorte y son: La determinación del puntaje de calcio de las arterias coronarias, la valoración de la permeabilidad de los stent o de los injertos vasculares, la evaluación de la morfología cardíaca y por último la angiotac que valora a las arterias coronarias sin cateterismo.²¹

Aplicaciones en oncología

Basados en su sensibilidad y especificidad los estudios PET-CT son de gran utilidad desde el momento en que se realiza el diagnóstico primario de una tumoración hasta que el paciente es dado de alta de la enfermedad.

Diagnóstico primario: Sobre este punto la capacidad del estudio PET-CT radica en que puede determinar la naturaleza de un tumor en relación con la malignidad o benignidad con una sensibilidad entre 85% a 99% y una especificidad entre el 81% a 95%. Cuando el estudio es positivo, llegando a tener un VPP entre el 90% y 95%, los datos asociados del CT multicorte favorecen el establecimiento de los criterios de reseabilidad del tumor primario. Ya que se puede determinar la infiltración a órganos y tejidos vecinos, el compromiso vascular y la posibilidad de extensión linfática o por otro medio a los tejidos vecinos. Cuando el estudio es negativo el valor predictivo negativo se acerca al 100% para la mayoría de los tumores.

Estratificación: Uno de los inconvenientes de realizar un estudio de imagen para valorar una tumoración en una zona muy localizada es que a pesar de que el tumor tenga características benignas o malignas, no se puede determinar hasta qué punto ese tumor ha avanzado; lo anterior es particularmente cierto si hablamos de tumores con conductas que no siempre siguen un patrón, por ejemplo un melanoma.

El estudio PET-CT no sólo tiene la ventaja de realizarse en forma de rastreo corporal total, sino que tam-

bién en ese rastreo intervienen dos técnicas de imagen complementarias que pueden llegar a detectar lesiones de cambios morfológicos de hasta 0.5 mm con la TC multicorte o lesiones con cambios metabólicos de hasta 3 mm. Supliendo una las “deficiencias de la otra”.

Seguimiento: El estudio PET-CT es totalmente reproducible, sin reacciones adversas al radiofármaco y con los nuevos medios de contraste iónicos existe muy escasa probabilidad de una reacción adversa a estos últimos; si así sucediera el estudio puede realizarse con sólo medio de contraste oral, que aunque disminuye la sensibilidad del rastreo, todavía su exactitud diagnóstica permanece alta. Lo anterior quiere decir que el rastreo PET-CT se puede usar con tranquilidad en la evaluación del seguimiento de los pacientes con cáncer. La capacidad de realizar mediciones semicuantitativas de la actividad metabólica del tumor primario y de sus metástasis con el PET asociado a la valoración de los parámetros morfológicos con CT, son herramientas diagnósticas útiles para determinar si la evaluación de un paciente con cáncer es adecuada. De esta forma se pueden detectar recidivas o remanentes de malignidad con gran sensibilidad. De hecho el alto valor predictivo negativo de un rastreo PET-CT reportado como negativo es utilizado como un criterio de alta o de curación de la enfermedad.

Respuesta al tratamiento: La determinación visual, pero con mayor objetividad la semicuantificación con SUV de la actividad metabólica de un tumor, antes, durante y después de tratamientos como la radioterapia o la quimioterapia, puede ser usada para “medir” la efectividad de estos tratamientos instaurados.

En general es mejor realizar un rastreo PET-CT entre 4 a 6 semanas después de un tratamiento pues si la respuesta a esta terapia es adecuada los niveles de actividad metabólica determinada por SUV disminuyen muy por debajo de lo que se encontraba en el estudio basal. Realizar un rastreo PET-CT antes de ese tiempo puede confundir un aumento de actividad metabólica del tumor con el aumento de actividad metabólica con aumento de captación de FDG-F18 debido a los procesos inflamatorios que se producen en respuesta a la propia terapia.

Sin embargo, se ha demostrado que un aumento rápido de captación de FDG-F18, aun dos días después de iniciado el tratamiento, puede ser predictor de una adecuada respuesta al tratamiento en algunos tumores. Es obvio que en caso de una adecuada respuesta a la terapia la actividad metabólica disminuya a medida que el tiempo avanza y 4 a 6 semanas después debe encontrarse por debajo de los valores del estudio basal. Por otra parte si inmediatamente después de iniciado el trata-

miento no hay elevación de la actividad metabólica, con respecto al estudio basal, existe una gran posibilidad de que la respuesta a la terapia sea pobre o no exista.²²

Planeación de la radioterapia: El propósito de realizar la planeación de la radioterapia basada en un rastreo PET-CT está apoyado en varios aspectos, la exactitud anatómica de las imágenes de la CT multicorte que puede localizar y delimitar perfectamente cualquier masa tumoral, la perfecta localización de la zona con mayor actividad metabólica dentro del tumor realizada con el rastreo PET, la planeación de un aumento de la dosis de radiación en casos de respuestas parciales y la suspensión de la radioterapia en caso de nula respuesta o de curación demostradas por PET. Pero tal vez el aspecto más importante es que una planeación basada en la determinación anatómica exacta de la CT con la localización también exacta de los puntos de mayor actividad metabólica, ayudan a realizar una adecuada colimación del haz de radiación evitando la irradiación a los tejidos sanos y a los problemas que eso conlleva.

Los equipos actuales poseen sistemas de cómputo que son compatibles con otros muchos sistemas de otros equipos médicos y se puede realizar una transferencia de las imágenes adquiridas en el PET-CT a los equipos de radioterapia con el fin de planear adecuadamente la radioterapia²³ (Figuras 5 y 6).

Valoración de los criterios quirúrgicos: Es la gran capacidad del rastreo PET-CT en determinar la extensión a las estructuras vasculares, neurológicas o linfáticas o de determinar la presencia de metástasis a distancia, lo que hace que este estudio sea útil para determinar el criterio quirúrgico de resecabilidad del tumor.³⁶

Posibles fallas del rastreo PET-CT

En cuanto al PET, siempre que exista un proceso inflamatorio o infeccioso existe la posibilidad de un reporte falso positivo debido a la alta tasa de captación del FDG-F18 en estas condiciones, se recomienda no solicitar el estudio en posquirúrgicos inmediatos, postergándolo de 4 a 6 semanas. Algunos tumores definitivamente no captan FDG-F18, o su captación apenas si sobrepasa el nivel de concentración del tejido sano anexo, por lo tanto existe la posibilidad de un falso negativo como en el carcinoma hepatocelular. En el caso de falsos negativos porque la lesión fuera de un tamaño muy pequeño, siempre se ha correlacionado con estadios T. i.s. o T1.

Una tomografía sin medio de contraste IV puede disminuir la especificidad del estudio.²⁴

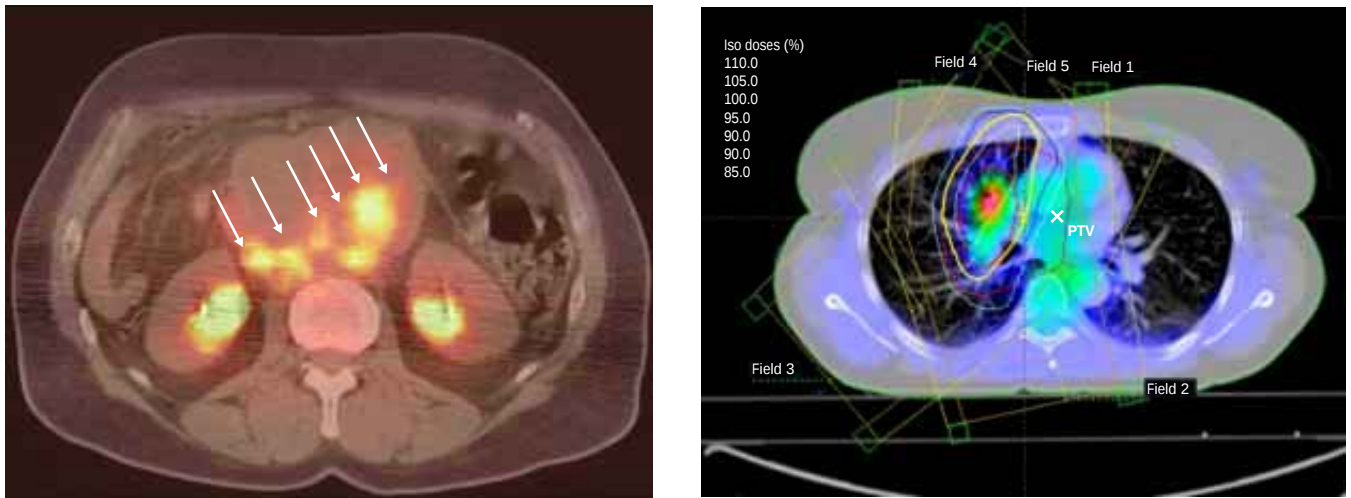


Figura 5. Izquierda. Corte axial de una imagen de fusión PET-CT abdominal en donde se observa una gran tumoración abdominal, demostrada por la CT. No obstante el gran tamaño de esta tumoración, la planeación de la radioterapia se basa solamente en las zonas de mayor actividad metabólica demostradas por el PET (Flechas). Derecha. Planeación propia de la radioterapia, basada en un corte axial de un rastreo PET-CT en tórax. Cortesía de la University of Pittsburgh Medical Center.

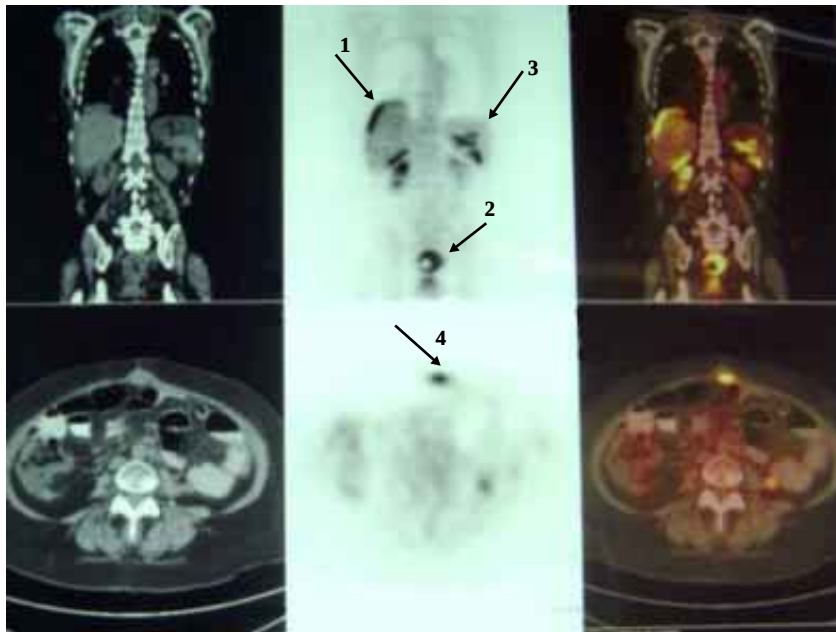


Figura 6. Cortes coronal, arriba y axial, debajo de la región toracoabdominal de un rastreo PET-CT, con las correspondientes imágenes de CT, a la izquierda, PET, en el centro y de fusión PET-CT. En una paciente de 56 años posoperada de un GIST. El estudio demuestra cómo existe líquido ascítico de origen tumoral alrededor del hígado (flecha 1), este líquido ha drenado por la gotera parietocólica y se ha alojado en la pelvis en la línea media (flecha 2). Por otra parte existe persistencia de actividad metabólica en la tumoración primaria (flecha 3) e implante de tumor en el área de la cicatriz quirúrgica (flecha 4). Cortesía del Hospital Sirio Libanés, São Paulo, Brasil.

Tumores

A continuación enunciaremos una lista de tumores en los cuales los estudios PET-CT son útiles y se describirán de sus aplicaciones especiales

Gliomas: El estudio de gran utilidad para la búsqueda y determinación del grado de diferenciación celular de los gliomas mediante una cuantificación de la actividad metabólica celular tumoral, así como para descartar,

otras zonas de actividad cerebral o incluso a distancia.

Metástasis cerebrales: Las indicaciones cerebrales se extienden a la búsqueda de metástasis cerebrales de tumores de cualquier origen.²⁵

Tumores de cabeza y cuello: Debido a que es un terreno de “difícil diagnóstico” por la cantidad de estructuras que convergen en un área relativamente pequeña, el PET-CT puede ser utilizado para localizar tumores de cabeza y cuello con una muy buena sensi-

bilidad y especificidad. De acuerdo con su origen pueden ser estudiadas neoplasias con origen en la cavidad nasal, de la cavidad oral, de los senos paranasales, nasofaringe, orofaringe, hipofaringe y laringe.

Carcinoma de tiroides: A pesar de la gran especificidad de los rastreos con ¹³¹I realizados con medicina nuclear, la gran sensibilidad de los rastreos PET favorece la utilización de este método de diagnóstico para estudiar a los pacientes con carcinomas de tiroides. A lo anterior le podemos asociar la especificidad anatómica dada por la CT, obteniendo un estudio de alta confiabilidad. De otra manera, en el seguimiento de los pacientes, el PET-CT tiene la ventaja de no ser necesaria la suspensión de la terapia sustitutiva hormonal tiroidea para realizar el rastreo en los casos de elevación de la tiroglobulina y de que se pueden rastrear tumores que no tienen avidéz por el ¹³¹I, como los anaplásicos y estadificar pacientes con procesos familiares como las neoplasias endocrinas múltiples.²⁶

Cáncer de pulmón: Debido a que el cáncer de pulmón es el cáncer más frecuente en el hemisferio occidental y que fue precisamente el rastreo PET para cáncer de pulmón el primero en ser aprobado por el Sistema Nacional de Salud y por las compañías aseguradoras en los Estados Unidos, se ha tenido una buena experiencia con PET en este campo, sobrepasando por mucho la especificidad y exactitud diagnósticas al comparar con la propia CT.

Metástasis pulmonares: La sensibilidad del PET para detectar lesiones metastásicas de menos de 0.6 cm siempre había sido un inconveniente. La nueva generación de equipos PET con mayor cantidad de cristales, los cuales son más sensibles y la asociación del PET-CT multicorte ha determinado que lesiones metastásicas a pulmón de hasta 0.3 mm puedan ser encontradas. Con aumentos de hasta 25% en la exactitud diagnóstica si se compara con la TC sola.²⁷

Cáncer de mama: El rastreo PET-CT es útil para valorar el cáncer de mama en todas sus etapas.¹⁷

Cáncer de páncreas: El diagnóstico preoperatorio, la valoración y el tratamiento del cáncer pancreático siguen siendo un desafío hoy día. El valor predictivo negativo permanece bajo cuando son utilizadas otras modalidades diagnósticas. Hay evidencia reciente de que la sobreexpresión de las GLUT por células pancreáticas malignas contribuye a una incrementada captación de FDG por estas neoplasias. La limitación del método en este caso es que algunos pacientes con cáncer de páncreas pueden tener elevación de los niveles de glucosa, que van a competir con la captación de FDG-F18 por el tumor.^{28,29}

Cáncer gastroesofágico: Aunque en algunos pacientes existe captación de la FDG-F18 en la pared gástrica, siendo normal, y esto podría eventualmente disminuir la sensibilidad para localizar una tumoración gástrica, otra vez es la fusión con el equipo CT que nos da una correlación anatómica exacta, localizando zonas de engrosamiento o de alteraciones morfológicas, que podemos correlacionar con su nivel de actividad metabólica con SUV.

En cuanto a las lesiones malignas en el esófago algunos tumores pueden tener una disminución de la captación de FDG-F18, pero el contraste existente entre la actividad del fondo y la lesión en tórax, es adecuada para determinar la presencia de infiltración local, a linfonodos o a distancia.³⁰

Cáncer de hígado y de vías biliares: La utilidad del rastreo PET-CT es mayor en la búsqueda de metástasis hepáticas que en la valoración del propio carcinoma hepático primario. Las razones son varias, muchos tumores pueden metastatizar al hígado y el origen frecuente de los carcinomas hepáticos primarios casi siempre es una cirrosis o una hepatitis de cualquier origen, con aumento de actividad del FDG-F18 en el hepatocito, lo cual disminuye su sensibilidad.

Los colangiocarcinomas ya sean intra o extrahepáticos a menudo son inextirpables en el momento del diagnóstico y tienen un mal pronóstico pero el PET-CT es útil en la estadificación.

El carcinoma de la vesícula aunque en el 75% de los casos está asociado a la colelitiasis, por eso su diagnóstico se realiza en el espécimen quirúrgico. El rastreo PET-CT puede ser utilizado en este caso para determinar los remanentes o "siembras" persistentes del tumor.^{31,32}

Cáncer colorrectal: El cáncer colorrectal tiene la segunda tasa de mortalidad más alta después del cáncer de pulmón. Las técnicas de imagen morfológicas tradicionales, así como las de medicina nuclear no apoyan suficientemente al oncólogo al momento de tomar decisiones debido a que la anatomía, especialmente en el colon descendente y en el recto, no favorece al diagnóstico por imagen en este caso. Con procedimientos de vaciado vesical con diurético, estimulación del tránsito intestinal o adquisición de imágenes tardías, el diagnóstico por imagen PET-CT ha ganado terreno gracias a la excelente exactitud diagnóstica dada por la combinación de estas técnicas.^{32,33}

Cáncer cervicouterino y de ovario: Al igual de lo que sucede con el cáncer colorrectal, las aplicaciones de los estudios de medicina nuclear en el cáncer cervicouterino y de ovario estaban limitadas. Aun con la llegada del PET, existía una buena cantidad de falsos positivos reportados. El PET-CT incrementó las

indicaciones en estas patologías a los seguimientos y búsqueda de recidivas.³⁴

Sistema genitourinario

Riñones y vías urinarias: Uno de los posibles falsos positivos del rastreo PET se debe a que la eliminación renal del FDG-F18 o la concentración del mismo en las pelvis renales puede llegar a simular una concentración anormal de este trazador simulando un área de metabolismo anormal. Esto se ha corregido con la localización anatómica realizada por la CT, siendo especialmente útil cuando se trata de cáncer de vejiga, en donde se deben utilizar técnicas especiales con diurético o canalizar la vejiga con el fin de delimitar las lesiones.³⁵

Testículo: El riesgo del diagnóstico de los tumores de testículo, seminomas o no seminomas, radica en que cuando ocurre la detección del tumor ya existen metástasis hasta en un 20% en el estadio I. La correcta estadificación del paciente debe ser prioritaria para tomar una decisión quirúrgica o terapéutica diferentes. El PET-CT puede establecer la presencia de infiltraciones linfáticas menores o descartarlas, cambiando la conducta a seguir.^{36,37}

Próstata: La gran incidencia de cáncer de próstata hace que el día de hoy se busquen nuevos métodos de diagnóstico. Aunque el PET-CT no parece ser útil en el diagnóstico primario de la enfermedad, en la estadificación, respuesta a la terapia y seguimiento, el PET-CT juega un papel muy importante. Aunque se han reportado que la sensibilidad del PET a las lesiones metastásicas óseas puede ser tan baja como 65%: Sin embargo, con la nueva tecnología de los equipos PET y con tomógrafos multicorte, se puede obtener imágenes de alta resolución y calidad diagnósticas de la próstata y de sus correlaciones anatómicas.^{38,39}

Melanoma: Dentro de la imagenología, el melanoma maligno siempre ha sido un reto. Especialmente en la estadificación de un melanoma que está sobrepasando los 4 mm de espesor. El rastreo PET es el único estudio de imagen capaz de estadificar a un paciente con una lesión como ésta. La asociación PET-CT mejora la correlación anatómica del diagnóstico hecho con PET, pero sobre todo incrementa la sensibilidad ya que al realizarse dos estudios en rastreo corporal total, prácticamente no hay lesiones que escapen a esta detección; sobre todo en estos tumores que pueden extenderse a cualquier parte del cuerpo sin patrón alguno.^{40,41}

Linfomas: Debido a su alta sensibilidad, los estudios PET-CT son utilizados para realizar el rastreo

inicial en un paciente con linfoma, siendo además útil en el reestadiaje después de la terapia o posquirúrgica. La especificidad puede ser menor o igual que la especificidad reportada para el galio 67, sin embargo la mayor sensibilidad y localización del PET-CT, hacen de este último estudio una excelente herramienta diagnóstica en esta enfermedad.^{42,43}

Neurología

Aplicación de imágenes híbridas PET-CT en cerebro

Una línea de investigación de la medicina nuclear se ha dedicado a la evaluación del sistema nervioso central. En los años recientes se han desarrollado radiofármacos con capacidad de distribuirse en proporción al flujo sanguíneo cerebral (FSC), atravesando la barrera hematoencefálica intacta, para ser captados por el cuerpo neuronal, luego hacer uniones con receptores específicos e incorporarse a las vías metabólicas para ser procesadas por el tejido en estudio. Esto ha permitido evaluar las funciones metabólicas del tejido cerebral en su conjunto y por regiones.⁴⁴⁻⁴⁶

Por el momento las aplicaciones clínicas de la técnica PET/CT en sistema nervioso central son las mismas que para la PET convencional, con el valor agregado de la CT, sin embargo dada la flexibilidad del estudio nuevas aplicaciones están siendo estudiadas.



Figura 7. A la izquierda un corte axial de cerebro de una CT, que demuestra una zona hiperdensa que compromete el hemisferio izquierdo en la región temporal. A la derecha el corte axial de un estudio PET-CT, asociado a las imágenes de la angiotac cerebral, en donde se demuestran, el aumento de actividad metabólica anormal cerebral por el PET, las relaciones anatómicas y vasculares por el CT y la angiotac, en relación con un meningioma. Cortesía Hospital Hart Ziekenhuis, Lier, Bélgica.

En los procesos neurodegenerativos como en el caso de las **demencias**, el uso de PET-CT tiene ventajas; la CT permite corregir la actividad metabólica de la PET en relación al grado de atrofia, para una precisa correlación de las zonas de hipometabolismo de glucosa en regiones temporoparietales, cíngulo posterior y precúneo, con el beneficio de un diagnóstico muy temprano, aun mucho antes de que aparezcan los cambios morfológicos demostrados por RM, en la enfermedad de **Alzheimer**, pudiéndose también valorar el desarrollo de la enfermedad y su respuesta a tratamientos que retardan la evolución (inhibidores de acetil-colinesterasa).

Los reportes indican que los pacientes con **epilepsia** en su mayoría no muestran alteraciones morfológicas, por lo que el uso de la PET/CT permite estable-

cer con precisión las estructuras involucradas en zonas de hipometabolismo en estudios en fase interictal. La modalidad ictal se prefiere para ser realizada en pacientes refractarios a tratamiento con alta incidencia de crisis, tienen más posibilidades de éxito en la localización de la zona de descarga epileptógena en fase ictal⁴⁷⁻⁵³ (Figura 7).

Cardiología

Todas las modalidades de imagen no invasivas han llegado a ser una importante clave en la evaluación de pacientes con enfermedad arterial coronaria.

El estudio de la perfusión miocárdica es la técnica mayor utilizada en la cardiología nuclear casi por 3 décadas dirigiendo sus principios en la fisiología y patofi-

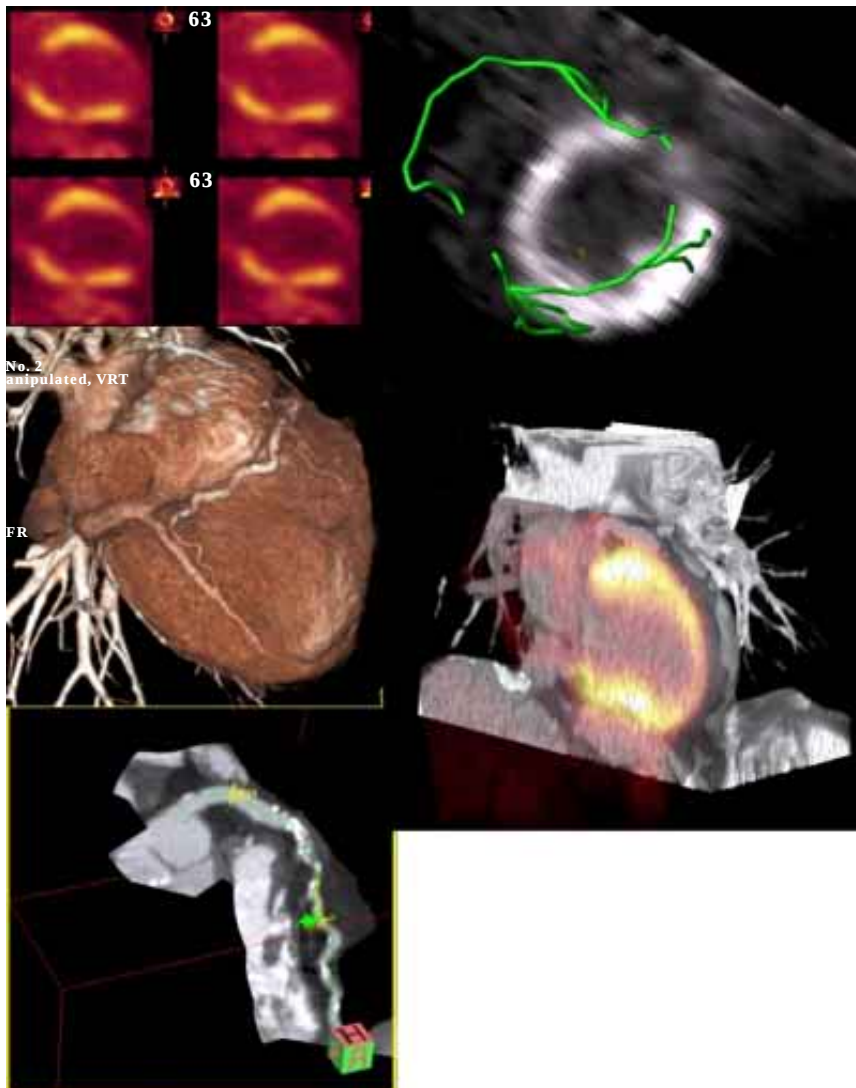


Figura 8. A la izquierda, arriba, cortes sagitales del ventrículo izquierdo en un estudio PET para valorar metabolismo cardíaco con FDG-F18 con una zona de ausencia de actividad metabólica en el ápex. En el medio, reconstrucción 3D a partir de un CT multicorte del corazón, con el cual se puede valorar la morfología cardíaca y de las arterias coronarias. Abajo medición del puntaje de calcio de la arteria descendente anterior por CT. A la derecha, arriba, fusión de un corte axial de un estudio PET, en donde hay un defecto del metabolismo anterolateral, con la imagen de sustracción de las arterias coronarias superpuesta sobre el estudio PET. Abajo, Fusión PET-CT en un corte sagital del ventrículo izquierdo del corazón.

siología: Imbalance entre el aporte y la demanda, determinantes de flujo miocárdico sanguíneo, determinantes de la función ventricular, hibernación, aturdimiento. El futuro de la cardiología nuclear se encuentra ya en nuestro país y en varios centros hospitalarios con la utilización de la tomografía por emisión de positrones (PET) a través de la utilización de trazadores radiactivos de alta energía producidos por un ciclotrón, con la incorporación de imágenes con otras modalidades tecnológicas tomografía computarizada (CT).

El PET es una de las modalidades de diagnóstico por imagen no invasivas, que tiene la capacidad de evaluar la perfusión, la función y el metabolismo cardíaco. Su alta sensibilidad y especificidad radica en que detecta los cambios fisiológicos y bioquímicos que ocurren al inicio de la enfermedad del corazón, antes que existan alteraciones estructurales tardías.

En cardiología las indicaciones más importantes de estudios con PET son: La determinación de viabilidad miocárdica con F18-FDG y el estudio de la reserva coronaria, con determinación de flujo sanguíneo relativo y absoluto con 13- nitrógeno – amonía.² El campo actual de acción de la PET está centrado en los estudios de investigación básica a través de los diferentes protocolos, en los que se necesita una alta precisión en las mediciones, con cuantificaciones absolutas o relativas, y en la práctica clínica en los pacientes cardiológicos en los cuales el SPECT no puede obtener una alta eficacia diagnóstica debido a sus limitaciones técnicas o cuando se precisa información sobre procesos metabólicos del músculo cardíaco.

El futuro del PET en México en el campo de la imagenología diagnóstica es prometedor en la cardiología, así como en el resto de otras especialidades. Hay que tomar en cuenta que los costos de un servicio PET deben abarataarse lo suficiente para que sea rentable para su uso clínico y que sea extensible para todos los pacientes que requieran el estudio, además de borrar esa idea de que esta técnica no es exclusiva de centros universitarios de investigación.

El principio de la CT evoca el trabajo del matemático austriaco J. Radon. Él demostró en 1917, que la imagen de un objeto en tercera dimensión puede ser reconstruida a partir de un número infinito de imágenes en segunda dimensión de un objeto. El rol principal de la tomografía computarizada en el diagnóstico de la enfermedad cardiovascular fue realizada después por diferencias en la atenuación de los rayos X y el miocardio infartado.

A partir de estos hallazgos han surgido avances tecnológicos con la incorporación de una nueva generación de equipos de tomografía de emisión de positro-

nes PET combinados con la tomografía computarizada CT. Aunque el campo actual está enfocado a los estudios de oncología. Sin embargo, estas nuevas generaciones de equipos son óptimos para obtener imágenes cardíacas y se deben conocer las ventajas y desventajas de estos equipos.

El futuro de la medicina nuclear está en el PET/CT en donde se podrán recabar valiosos datos diagnósticos, pronósticos, de perfusión miocárdica, función, puntaje de calcio coronario y la angiografía coronaria todo fusionado en un solo estudio⁵⁴⁻⁵⁸ (Figura 8).

Referencias

1. CONAPO, 2002. Proyecciones de la Población de México, 2000 – 2050, <http://busca.ssa.gob.mx/cgi-bin/s.cgi?q=MORTALIDAD>.
2. McCarthy TJ, Schwarz SW, Welch MJ. Nuclear Medicine and PET: an overview. *J Chem Ed* 1994; 71: 830-836.
3. Finn RD. The search for consistency in the manufacture of PET radiopharmaceuticals. *Ann Nucl Med* 1999; 132379-382.
4. Robert R. Morris, first edition, *Book of Society of Nuclear Medicine 1954-2002, 50 years of excellence*. 2004. Special Edition.
5. McCarthy TJ, Welch MJ. The state of positron emitting radionuclide production in 1997. *Sem Nucl Med* 28: 235-246.
6. Murray IPC. *Nuclear Medicine in Clinical Diagnosis and treatment, text book*. Sidney Australia, 1994; 8: 1279-1298.
7. Freedman G. *Tomographic imaging in nuclear medicine*. New York: New York Society of nuclear medicine, ed. 1973: 151-153.
8. Kinahan PE, Townsend DW, Beyer T et al. PET Attenuation correction for a combined 3D PET/CT scanner. *Med Phys* 1998; 25: 2046-2053.
9. Pisani P, Guzzardi R, Bellina CR, Sorace O. User-friendly image processing software tools: general purpose features and application to the correlation of PET-CT brain images. *Med Prog Technol* 1991; 17(3-4): 205-9.
10. Townsend DW, Cherry SR. Combining anatomic and function, the path of the true image fusion. *Eur Radiol* 2001; 11: 1968-1974.
11. Zasadny KR, Wahl RL. Standardized uptake values of normal tissues at PET with 2-[fluorine-18]-fluoro-2-deoxy-D-glucose: variations with body weight and a method for correction. *Radiology* 1993; 189(3): 847-50.
12. Tse N, Hoh C, Hawkins R et al. The application of PET imaging with FDG to the evaluation of breast disease. *Ann Sur* 1992; 216: 27-34.
13. Gustav K, Von Schulthess. PET, PET/CT and SPECT/CT. *Clinical Molecular Anatomic Imaging*. Philadelphia: 2003: 141-144.
14. Davson P, Cosgrove DO, Grainger RG. *Text Book of contrast media*. Oxford: Isis Medical Media Ltd. eds., 1999.
15. Groves AM, Bird N, Tabor I, Cheow HK, Balan KK. 16-Detector multislice CT-skeletal scintigraphy image co-registration. *Nucl Med Commun* 2004; 25(11): 1151-5.
16. Wahl RL, Buchanan JW. *Principles and Practice of Positron Emission Tomography*. Philadelphia. Chapter 5.2; 2002: 111-136.
17. Oehr P, Biersack HP, Coleman RE. *PET and PET-CT in Oncology*. New York 2004.
18. Cowan RJ. Conventional Radionuclide Brain Imaging in the Era of Transmission and Emission Tomography. *Sem Nucl Med* 1986; 16: 63-73.

19. Cohade C, Wahl RL. Applications of Positron Emission Tomography/Computed Tomography Image Fusion in Clinical Positron Emission Tomography-Clinical Use, Interpretation Methods, Diagnostic Improvements. *Sem Nucl Med* 2003; 3: 228-237.
20. Bacharach SL. The new-generation positron emission tomography computed tomography scanners: Implications for cardiac imaging. *J Nucl Cardiol* 2004; 11: 388-92.
21. Xu SW, Zhang XL, Zeng JH, Wang JY, Li TR, Qian GN, Gao RG. Clinical application of 16-slice spiral CT coronary Angiography. *Di Yi Jun Yi Da Xue Xue Bao* 2005; 25(2): 218-22.
22. Charron M et al. Image analysis in patients with cancer studied with a combined PET and CT scanner. *Clin Nucl Med* 25: 905-910.
23. Touboul E, Deniaud-Alexandre E, Moureau-Zabotto L, Lerouge D. The impact of integrating images of positron emission tomography with computed tomography simulation on radiation therapy planning. *Cancer Radiother.* 2004; 8(Suppl 1): S29-35.
24. Bockisch A, Beyer T, Antoch G, Freudenberg LS et al. Positron emission tomography/computed tomography—imaging protocols, artifacts, and pitfalls. *Mol Imaging Biol* 2004; 6(4): 188-99.
25. Myers R. The application of PET-MRI image registration in the brain. *BJR* 2002; 75: S31-S35.
26. Adams S, Baum RP, Stuckensen T, Bitter K, Hor G. Prospective comparison of 18F-FDG PET with conventional imaging modalities (CT, MRI, US) in lymph node staging of head and neck cancer. *Eur J Nucl Med* 1998; 25: 1255-60.
27. Gould MK, Maclean CC, Kuschner WG, Rydzak CE, Owens DK. Accuracy of positron emission tomography for diagnosis of pulmonary nodules and mass lesions: a meta-analysis. *JAMA* 2001; 285: 914-24.
28. Reske S, Grillenberger KG, Glatting G. Overexpression of glucose transporter 1 and increased F-18 FDG uptake in pancreatic carcinoma. *J Nucl Med* 1997; 38: 1344-1348.
29. Inokuma T, Tamaki N, Torizuka T. Evaluation of pancreatic tumor with PET and F18- FDG: Comparison with CT and US. *Radiology* 1995; 195: 345-352.
30. van Westreenen HL, Heeren PA, van Dullemen HM, van der Jagt EJ, Jager PL, Groen H, Plukker JT. Positron emission tomography with F-18-fluorodeoxyglucose in a combined staging strategy of esophageal cancer prevents unnecessary surgical explorations. *J Gastrointest Surg* 2005; 9: 54-61.
31. Keiding S, Hansen SB, Rasmussen HH, Gee A, Kruse A, Røelsgaard K, Tage-Jensen U, Dahlerup JF. Detection of cholangiocarcinoma in primary sclerosing cholangitis by positron emission tomography. *Ugeskr Laeger* 2000; 162: 782-5.
32. Hustinx R. PET imaging in assessing gastrointestinal tumors. *Radiol Clin North Am* 2004; 42: 1123-39.
33. Larson SM, Schoder H, Yeung H. Positron emission tomography/computerized tomography functional imaging of esophageal and colorectal cancer. *Cancer J* 2004; 10: 243-50.
34. Sironi S, Messa C, Mangili G, Zangheri B, Aletti G et al. Integrated FDG PET/CT in patients with persistent ovarian cancer: correlation with histologic findings. *Radiology* 2004; 233: 433-40.
35. Schoder H, Larson SM. Positron emission tomography for prostate, bladder, and renal cancer. *Semin Nucl Med* 2004; 34: 274-92.
36. De Santis M, Bokemeyer C, Becherer A, Stoiber F, Oechsle K et al. Predictive impact of 2-18fluoro-2-deoxy-D-glucose positron emission tomography for residual postchemotherapy masses in patients with bulky seminoma. *J Clin Oncol* 2001; 19: 3740-4.
37. Muller-Mattheis V, Reinhardt M, Gerharz CD, Furst G. Positron emission tomography with [18 F]-2-fluoro-2-deoxy-D-glucose (18FDG-PET) in diagnosis of retroperitoneal lymph node metastases of testicular tumors. *Urologe A* 1998; 37: 609-20.
38. Morris MJ, Akhurst T, Osman I, Nunez R, Macapinlac H, Siedlecki K, Verbel D, Schwartz L, Larson SM, Scher HI. Fluorinated deoxyglucose positron emission tomography imaging in progressive metastatic prostate cancer. *Urology* 200; 59: 913-8.
39. Matthies A, Ezziddin S, Ulrich EM, Palmedo H, Biersack HJ, Bender H, Gohlke S. Imaging of prostate cancer metastases with 18F-fluoroacetate using PET/CT. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 2004; 31: 797.
40. Weng LJ, Schoder H. Melanoma metastasis to the testis demonstrated with F Schmidt GP, Baur-Melnyk A, Tiling R, Hahn K, Reiser MF.
41. Schoenberg SO. DG PET/CT. *Clin Nucl Med* 2004; 29: 811-2. Comparison of high resolution whole-body MRI using parallel imaging and PET-CT. First experiences with a 32-channel MRI system. *Radiologe* 2004; 44: 889-98.
42. Steinert HC. PET/CT in lymphoma patients. *Radiologe* 2004; 44: 1060-7.
43. Wiedmann E, Baican B, Hertel A, Baum RP, Chow KU. Positron emission tomography (PET) for staging and evaluation of response to treatment in patients with Hodgkin's disease. *Leuk Lymphoma* 1999; 34: 545-51.
44. Martí JM, Maldonado A. SPECT cerebral: fundamentos e interpretación. *Rev Neurol* 1994; 22: S9-S18.
45. Cowan RJ. Conventional Radionuclide Brain Imaging in the Era of Transmission and Emission Tomography. *Sem Nucl Med* 1986; 16: 63-73.
46. Arbizu J, García Velloso MJ. Radiotrazadores en SPECT Cerebral. *Rev Neurol* 1994; 22: S19-S27.
47. Lassen NA. On the history of measurement of cerebral blood flow in man by radioactive isotopes. In: Costa DC, Morgan GF, Lassen NA. *New Trends in Nuclear Neurology and Psychiatry*. (Eds.) John Libbey. London 1993: 3-13.
48. Miles KA. Brain Perfusion: computed tomography applications. *Neuroradiology* 2004; 46(Suppl 2): 194-200.
49. Cohade C, Wahl RL. Applications of Positron Emission Tomography/Computed Tomography Image Fusion in Clinical Positron Emission Tomography-Clinical Use, Interpretation Methods, Diagnostic Improvements. *Sem Nucl Med* 2003; 3: 228-237.
50. Steinert HC, Von Schulthess GK. Initial clinical experience using a new integrated in-line PET/CT system. *BJR* 2002; 75: S36-S38.
51. Klutz P, Villemagne VV, Meltzer C, Chander S, Martinelli M, Townset D. The Case for PET/CT. Experience at the University of Pittsburgh. *Clin Positron Imaging* 2000; 3(4): 174.
52. Townsend DW, Beyer T. A combined PET/CT scanner: the path to true image fusion. *BJR* 2002; 75: S24-S30.
53. Cochrane MJ, Lee IS. PET/CT for Tumor Imaging. *Radiology Rounds* 2004; 2(5).
54. Barry L, Zaret MD, Second Annual Mario S. Verani, MD, Memorial Lecture. Nuclear cardiology, the next 10 years. *J Nucl Cardiol* 2004; 11: 393-407.
55. Ornelas AM. Tomografía por emisión de positrones (PET) en Cardiología nuclear. *Boletín de Medicina Nuclear en Cardiología SMMN* 2003; 1(2): 3.
56. Santana BC, García EV. Tomografía por emisión de positrones en Cardiología Emory University Atlanta GA. (En impresión).
57. Roenlandt JR. Seeing the Heart; the success story of cardiac imaging. *European Heart Journal* 2000; 21: 1281-1288.
58. Bacharach SL. The new-generation positron emission tomography computed tomography scanners: Implications for cardiac imaging. *J Nucl Cardiol* 2004; 11: 388-92.

Correspondencia:
Dr. Iván Fabricio Vega González.
ivanvegamn@hotmail.com