



ARTÍCULO ESPECIAL

Medicina nuclear y radiofármacos



P. Sopena Novales^{a,*}, M.C. Plancha Mansanet^b, C. Martínez Carsi^a y R. Sopena Monforte^a

^a Servicio de PET-Medicina Nuclear, Hospital 9 de Octubre, Valencia, España

^b Servicio de Medicina Nuclear, Hospital Universitario Dr. Peset, Valencia, España

Recibido el 27 de agosto de 2013; aceptado el 2 de julio de 2014

Disponible en Internet el 7 de octubre de 2014

PALABRAS CLAVE

PET;
TC;
PET-TC;
RM;
PET-RM;
Medicina nuclear;
Captación

KEYWORDS

PET;
PET-TC;
MR;
PET-MR;
Nuclear medicine;
Uptake

Resumen La medicina nuclear es una moderna especialidad médica que permite realizar diagnósticos y tratamientos mediante la utilización de radiofármacos o radiotrazadores (fármacos unidos a un isótopo radioactivo). En Europa los radiofármacos se consideran un grupo especial de medicamentos y, por tanto, su preparación y su uso están regulados por un conjunto de directivas que han sido adoptadas por los distintos países miembros. Los radiofármacos que se emplean en las exploraciones diagnósticas se administran en dosis muy pequeñas por lo que, en general, no tienen ninguna acción farmacológica, ni efectos secundarios, ni reacciones adversas graves. El mayor problema asociado a su utilización son las alteraciones de su biodistribución, lo cual puede condicionar errores diagnósticos.

La medicina nuclear está experimentando un notable crecimiento condicionado por la aparición y desarrollo de nuevos radiofármacos, tanto en el campo diagnóstico como en el terapéutico, y fundamentalmente por el impacto de las nuevas técnicas de imagen multimodalidad (SPECT-TC, PET-TC, PET-RM, etc.). Es necesario conocer las limitaciones de estas técnicas, la distribución fisiológica y las posibles alteraciones de los radiofármacos, las contraindicaciones y las reacciones adversas de los contrastes radiológicos, así como la posible interferencia de ambos.

© 2013 SERAM. Publicado por Elsevier España, S.L.U. Todos los derechos reservados.

Nuclear medicine and radiopharmaceuticals

Abstract Nuclear Medicine is a medical specialty that allows modern diagnostics and treatments using radiopharmaceuticals original radiotracers (drugs linked to a radioactive isotope). In Europe, radiopharmaceuticals are considered a special group of drugs and thus their preparation and use are regulated by a set of policies that have been adopted by individual member countries. The radiopharmaceuticals used in diagnostic examinations are administered in very small doses. So, in general, they have no pharmacological action, side effects or serious adverse reactions. The biggest problem associated with their use are the alterations in their biodistribution that may cause diagnostic errors.

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: pet@hospitales.nisa.es (P. Sopena Novales).

Nuclear Medicine is growing considerably influenced by the appearance and development of new radiopharmaceuticals in both the diagnostic and therapeutic fields and primarily to the impact of new multimodality imaging techniques (SPECT-CT, PET-CT, PET-MRI, etc.). It's mandatory to know the limitations of these techniques, distribution and eventual physiological alterations of radiopharmaceuticals, contraindications and adverse reactions of radiological contrasts, and the possible interference of both.

© 2013 SERAM. Published by Elsevier España, S.L.U. All rights reserved.

Introducción

El Consejo para la acreditación de la educación médica graduada (ACGME) define la medicina nuclear como «la especialidad médica que utiliza el principio de los trazadores con radiofármacos para evaluar molecular, metabólica, fisiológica y patológicamente distintas situaciones del cuerpo con propósitos de diagnóstico, terapia e investigación»¹.

La medicina nuclear está experimentando un notable crecimiento en los últimos años condicionado por la aparición y desarrollo de nuevos procedimientos más específicos (estudios con MIBG, análogos de la somatostatina, transportador dopaminérgico pre y post-sináptico, imagen paratiroidea, marcajes de leucocitos, etc.) y también por el impacto de las técnicas de imagen multimodalidad².

Las imágenes de medicina nuclear con información fundamentalmente metabólica o molecular se fusionan con imágenes radiológicas de alto detalle anatómico (o resolución espacial), potenciando su capacidad diagnóstica. Este hecho está favoreciendo en los últimos años una estrecha colaboración entre los servicios de medicina nuclear y radiología, e incluso en algunos casos, su unificación. Por esto resulta cada vez más necesario familiarizarse con las complicaciones de los contrastes y radiofármacos que manejamos y también establecer algoritmos diagnósticos con objeto de obtener el mejor rendimiento, maximizando la seguridad y minimizando los riesgos de las distintas exploraciones¹⁻³.

Las Sociedades Europeas de Medicina Nuclear (EANM) y de Radiología (ESR) son conscientes de la necesidad de coordinar los esfuerzos formativos para el entrenamiento de ambos especialistas en la utilización eficiente de esta tecnología. Con este objetivo han desarrollado un currículum en el que se plantea una formación complementaria con 3 niveles de competencia, siendo el primero de ellos el de conocimiento básico (BK)⁴. Para los especialistas del campo de la radiología se entiende que precisan conocimientos, entre otros, de producción y propiedades de los radionucleidos, principio de los radiotrazadores, radiofarmacia, legislación, instrumentación y radioprotección⁴. Estos objetivos coinciden básicamente con los fijados para la formación del especialista en medicina nuclear⁵.

De acuerdo con esta filosofía en nuestro país está pendiente de publicación un RD que tiene por objeto potenciar, modernizar y actualizar el papel de la formación de especialistas en ciencias de la salud previsto en la Ley 44/2003 mediante la incorporación de criterios de troncalidad en la

formación de determinadas especialidades. Este RD en su anexo II estipula que la medicina nuclear y el radiodiagnóstico se integrarán en el tronco de imagen clínica (TCIC), con un período formativo común de 2 años, en los que se abordarán todos los conceptos básicos anteriormente mencionados.

El objetivo del presente trabajo es comentar los principales inconvenientes que pueden plantear los procedimientos de la medicina nuclear convencional con una especial mención a los derivados de la utilización de la PET-TC y de forma mucho más somera de los de la PET-RM.

Radionucleidos, radiotrazadores y radiofármacos

Los radionucleidos (isótopos radioactivos) son átomos con un núcleo inestable en los que se producen desintegraciones espontáneas del núcleo con la emisión de partículas: β^- (electrones), β^+ (positrones), α (núcleos con 2 protones y 2 neutrones), radiación γ y RX, que están formadas por ondas electromagnéticas. Los radionucleidos se caracterizan por su constante de desintegración (λ) que es característica de la sustancia radiactiva e independiente del estado físico en el que se encuentre.

El proceso de emisión cumple la ley de desintegración radiactiva, de forma que en toda muestra radiactiva, a medida que transcurre el tiempo, disminuye el número de átomos radiactivos. Así, se define el período de semidesintegración ($T_{1/2}$) como el tiempo que tiene que transcurrir para que el número de átomos radiactivos se reduzca a la mitad.

El principio de radiotrazador consiste en la capacidad para estudiar los componentes de un sistema homeostático sin alterar su función. Se cuenta que la primera utilización práctica de un radionucleido como trazador ocurrió en 1911, en una pensión de Manchester. Fue uno de los huéspedes, llamado George Hevesy, que trabajaba como ayudante en un laboratorio en el que se experimentaba con los isótopos radioactivos, recientemente descubiertos. Cada noche, al servirse la comida que preparaba la dueña de la pensión, le asaltaba la sospecha de que le estaban dando sobras de los días anteriores; conociendo las propiedades de los radioisótopos, se le ocurrió agregar una pequeña cantidad de una sal radioactiva a los restos de su comida. Al día siguiente llevó a la pensión un contador Geiger y cuando el menú se repitió comprobó que la comida emitía radiación. George

Tabla 1 Radionucleidos y radiofármacos

	Radionucleido	Tipo desintegración	Método producción	Radiofármaco	
PET	^{11}C	β^+	Ciclotrón	Acetato de ^{11}C sodio	Diagnóstico
	^{18}F	β^+	Ciclotrón	Fluodesoxiglucosa (^{18}F)	
				Fluoruro (^{18}F) de sodio	
				Fluoromisonidazol (^{18}F)	
				Fluorcolina (^{18}F)	
Medicina nuclear convencional	^{68}Ga	β^+	Generador	Fluorodopa (^{18}F)	
	^{13}N	β^+	Ciclotrón	Péptidos (^{68}Ga)	
	^{15}O	β^+	Ciclotrón	Amoníaco (^{13}N)	
				Agua (^{15}O)	
	^{82}Rb	β^+	Generador	Oxígeno (^{15}O)	
	^{67}Ga	CE	Ciclotrón	Rubidio (^{82}Rb) cloruro	
	^{123}I	CE	Ciclotrón	Galio (^{67}Ga) citrato	
				Ioduro (^{123}I) de sodio	
				Ioflupano (^{123}I)	
				Iobenguano (^{123}I)	
	^{131}I	β^- , γ	Reactor	Ioduro (^{131}I) de sodio	
				Iobenguano (^{131}I)	
	^{111}In	CE	Ciclotrón	^{111}In -DTPA-octreótido	
	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	TI	Generador	Pertecnato ($^{99\text{m}}\text{Tc}$) de sodio	
				Tecnecio ($^{99\text{m}}\text{Tc}$) oxidronato	
				Tecnecio ($^{99\text{m}}\text{Tc}$) sestamibi	
				Tecnecio ($^{99\text{m}}\text{Tc}$) exametazina	
				Tecnecio ($^{99\text{m}}\text{Tc}$) pentetato	
	^{131}I	β^- , γ	Reactor	Ioduro (^{131}I) de sodio	Terapia
				Iobenguano (^{131}I)	
	^{177}Lu	β^-	Reactor	^{177}Lu -DOTA-octreotate	
	^{186}Re	β^-	Reactor	Renio (^{186}Re) sulfuro	
	^{153}Sm	β^- , γ	Reactor	Lexidronam (^{153}Sm)	
	^{89}Sr	β^-	Reactor	Estroncio (^{89}Sr) cloruro	
	^{90}Y	β^- , γ	Reactor	Ibritumomab (^{90}Y)	
				Itrio (^{90}Y) citrato	

CE: captura electrónica; TI: transición isomérica.

Hevesy obtuvo en 1943 el premio Nobel por su aportación en la utilización de los radioisótopos como trazadores.

Cuando un radiotrazador se utiliza con fines diagnósticos o terapéuticos pasa a denominarse radiofármaco. Así, se define como radiofármaco cualquier producto que, cuando esté preparado para su uso con una finalidad diagnóstica o terapéutica, contenga uno o más radionucleidos⁶.

Los radionucleidos que forman parte de los radiofármacos son de origen artificial. Los dispositivos para producir este tipo de radionucleidos son los reactores nucleares, los aceleradores de partículas (lineales, ciclotrones...) y los generadores.

Un radiofármaco está formado por una molécula denominada ligando (vector de disposición) que presenta afinidad biológica por un órgano o sistema de órganos y por un radionucleido (vector de información) responsable de la emisión de la radiación. El ligando del radiofármaco es el que determina la distribución, metabolismo y eliminación del radiofármaco dentro del organismo, mientras que la emisión del radionucleido permite la detección externa del radiofármaco, así como la absorción interna de dicha radiación cuando se utiliza con fines terapéuticos.

En la [tabla 1](#) presentamos las principales características físicas de los radionucleidos, el tipo de desintegración, el método de producción y los ligandos más frecuentes.

Los radiofármacos se pueden utilizar con fines diagnósticos o terapéuticos. Los diagnósticos se consideran verdaderos trazadores, puesto que carecen de acción farmacodinámica, al administrarse en cantidades muy pequeñas (< 100 μg) y emitir lo que nos permite su detección externa. Se administran con el fin de visualizar la anatomía de un órgano o sistema, evaluar el comportamiento fisiológico en los tejidos, analizar a través de su metabolismo el comportamiento bioquímico, y/o determinar cuantitativamente sus parámetros farmacocinéticos.

Los radiofármacos utilizados con fines terapéuticos se administran con el objetivo de irradiar el tejido interno en el tratamiento del cáncer y de otras enfermedades. Su acción terapéutica se basa en el efecto que ejercen las radiaciones α o β^- sobre el tejido diana.

La medicina nuclear y sus riesgos

El riesgo asociado a la utilización de los procedimientos de la medicina nuclear está condicionado tanto por la

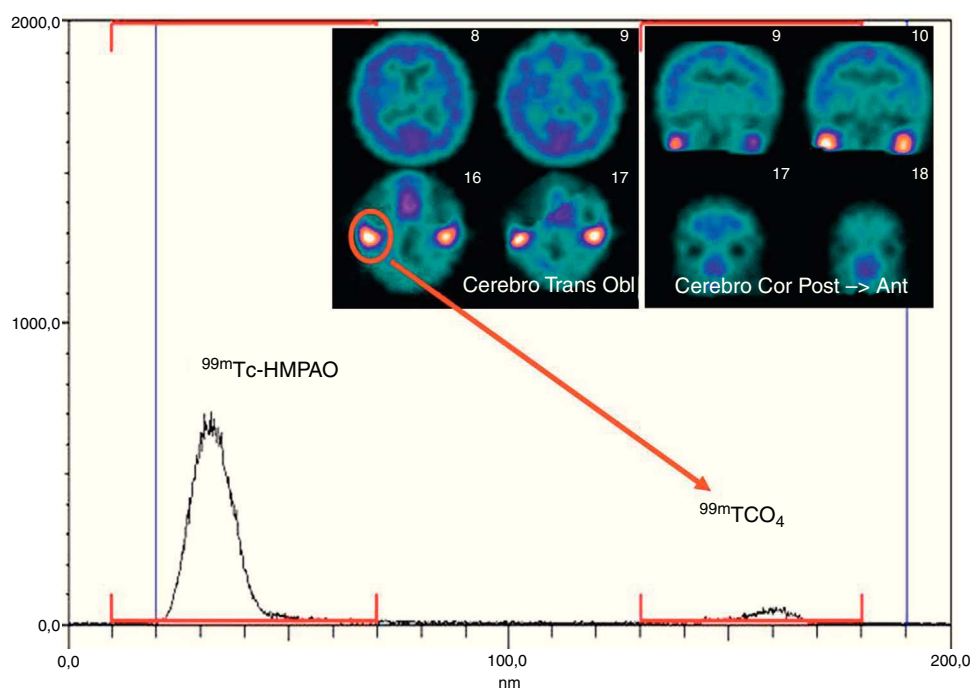


Figura 1 Estudio tomográfico (SPECT) cerebral de perfusión tras la administración intravenosa de ^{99m}Tc -HMPAO. Solo se muestran cortes coronales y axiales. En la fila superior se muestran cortes axiales (izquierda) y coronales (derecha), en los que se observa una disminución acentuada de la perfusión cortical con intensa captación glandular (parótidas). La cromatografía en capa fina ITLC-SG del ^{99m}Tc -HMPAO con cloruro sódico de solvente indica la presencia de tecnecio libre (pico de la derecha) responsable de la visualización parotídea. El lector puede ver esta figura a color en la versión electrónica del artículo.

utilización de los radiofármacos como por la exposición a las radiaciones ionizantes. Sin embargo, el problema que se nos presenta con mayor frecuencia en la práctica habitual es la alteración en la biodistribución de

los radiofármacos, lo que puede tener un significativo impacto en la interpretación de la exploración y, por tanto, en el juicio diagnóstico que emitimos (figs. 1 y 2).

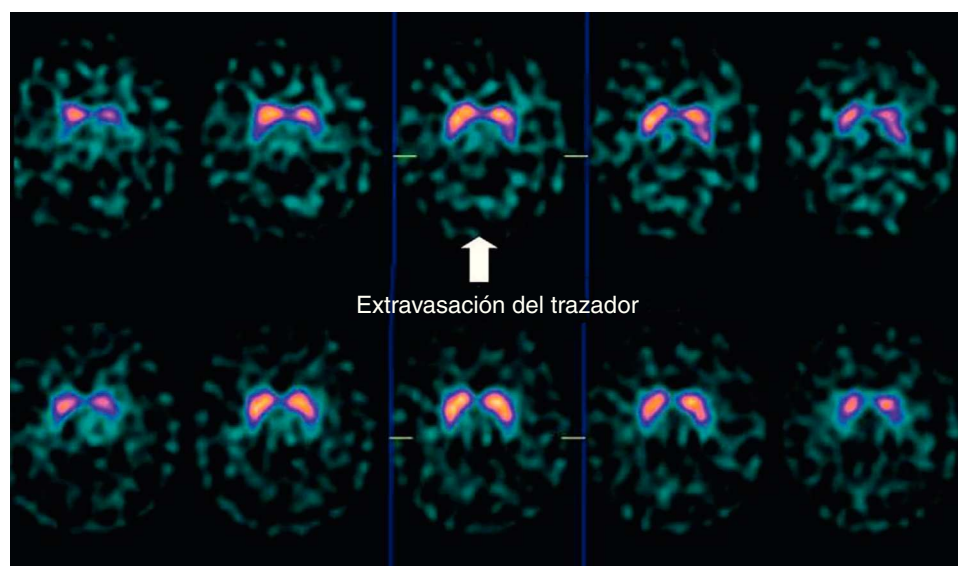


Figura 2 Estudio tomográfico (SPECT) cerebral tras la administración intravenosa de Ioflupano (^{123}I). Solo se muestran los cortes axiales. En la fila superior se objetiva una menor actividad global estriatal bilateral del transportador presináptico de dopamina y una menor definición de bordes. Este estudio, que parece anormal, estuvo condicionado por la extravasación del trazador, ya que repetida la exploración a la semana siguiente los hallazgos patológicos se normalizaron y se descartó alteración del transportador dopaminérgico presináptico. El lector puede ver esta figura a color en la versión electrónica del artículo.

Tomografía por emisión de positrones-tomografía computarizada

La FDG es un análogo de la glucosa y es el radiofármaco más habitualmente utilizado en la práctica clínica de la PET⁷. La FDG entra en las células mediante las proteínas transportadoras de membrana (fundamentalmente Glut 1) que están sobreexpresadas en las células cancerosas. A continuación, es fosforilada por la hexoquinasa (FDG-6-fosfato), también abundante en las células tumorales. Y por último, queda atrapada sin que siga la ruta metabólica normal, ya que la enzima responsable de su desfosforilización, la glucosa-6-fosfatasa, se encuentra en bajas concentraciones en la mayor parte de los tumores^{8,9}. De esta forma, los tumores muestran un incremento de la glucólisis (efecto Warburg)¹⁰ y como consecuencia de la captación de la FDG. Sin embargo, la ¹⁸FDG es un trazador inespecífico que también puede acumularse en lugares de infección o de inflamación, debido a la activación de las células de la serie blanca y a la estimulación de citoquinas y factores de crecimiento. Esto puede dar lugar a falsos positivos de lesiones tumorales^{11,12}.

Por otro lado, se debe ser muy cuidadoso para evitar cúmulos anormales del radiofármaco como, por ejemplo, en ganglios axilares tras una extravasación con migración linfática. También se debe evitar la inyección a través de catéteres centrales que pueden tener trombos. En otros casos, los cúmulos de la ¹⁸FDG pueden ser debidos a áreas de contaminación cutánea por orina depositada tras la micción¹³.

En la interpretación de las imágenes de la PET-TC las dos fuentes principales de error están ligadas al inadecuado conocimiento del patrón fisiológico de la distribución de la FDG y a los posibles artefactos introducidos por la utilización de la TC.

El conocimiento de la distribución normal de la FDG permite descartar falsos positivos en la interpretación de las imágenes.

El cerebro muestra una alta actividad debido a que la glucosa es sustrato energético fundamental para el metabolismo cerebral. Este hecho condiciona una subóptima resolución de contraste, por lo que esta técnica no es de elección para el estudio de las metástasis cerebrales (ya que pueden mostrarse hiper, hipo o isometabólicas), de lesiones pequeñas o de tumores de bajo grado.

En la cabeza y el cuello hay varias estructuras que muestran moderada-intensa captación del radiofármaco de tipo difuso y simétrico, como las glándulas salivares o las amígdalas. La existencia de asimetrías aconseja descartar un proceso inflamatorio o neoplásico.

La captación laríngea es generalmente simétrica. Cuando se observa una asimetría, sin justificación en la TC, se debe valorar una posible afectación del nervio laríngeo con parálisis de la cuerda no visualizada, como por ejemplo en enfermedad mediastínica o tiroidea¹⁴.

Cuando se observa en el tiroides una captación del radiofármaco de intensidad moderada-alta y de carácter difuso hay que descartar que se trate de una alteración funcional (tiroiditis o de una enfermedad de Graves)¹⁵ y cuando la captación es focal la probabilidad de malignidad oscila entre el 25 y el 50%¹⁶.



Figura 3 En la reconstrucción de máxima intensidad de proyección (MIP) del PET se observa intensa captación difusa intestinal en un paciente, debida a su tratamiento con anti-diabéticos orales.

La captación tímica se considera una variante normal en niños y en jóvenes adultos, pero también puede observarse tras la quimioterapia¹⁷.

El corazón muestra una captación variable dependiendo de los niveles de insulina, de forma que cuando son bajos el sustrato energético son los ácidos grasos y no la glucosa, produciendo una escasa visualización del miocardio¹⁸.

La captación en el tracto gastrointestinal es variable¹⁹, puede ser focal, difusa o segmentaria. La captación focal en el estudio basal que en el estudio tardío muestra un comportamiento sospechoso exige realizar una colonoscopia. La captación difusa suele ser fisiológica, aunque también puede observarse en la toma de anti-diabéticos orales (fig. 3). Por último, si es segmentaria se debe descartar enfermedad inflamatoria o infecciosa (entre otras: colitis, sigmoiditis, etc.).

El hígado suele mostrar una captación difusa y homogénea, similar al bazo, aunque de mayor intensidad; si es inferior hay que descartar enfermedad esplénica y/o valorar la situación hematológica (anemias, etc.)²⁰.

La ¹⁸FDG se excreta por los riñones sin ser reabsorbida, por lo que esta técnica tiene limitaciones en la valoración de la enfermedad del sistema urinario. En ocasiones los cúmulos focales de orina en los uréteres pueden simular adenopatías; en estas situaciones se debe revisar la reconstrucción PET coronal y las imágenes de la TC, de esta forma se contribuye a su correcta identificación.

En las mujeres premenopáusicas puede observarse captación endometrial durante la fases menstrual y ovulatoria, también de los ovarios durante la ovulación^{21,22}.

La captación muscular es muy débil y generalmente simétrica. La utilización de algún grupo muscular como consecuencia del ejercicio (hipertrofia) o de algún problema



Figura 4 En la reconstrucción MIP de la PET se observan depósitos cervico-torácicos con un patrón de captación típico de grasa parda activa.

concomitante produce asimetrías²³. Estos focos hipermetabólicos musculares deben ser valorados con la TC. La administración de insulina, sin las medidas de preparación adecuadas, en pacientes diabéticos conduce a una alteración en la biodistribución²⁴ con una aparición típica de «patrón muscular»²⁵.

La grasa parda es un tejido termogénico que se activa y produce un aumento del consumo de glucosa, generalmente en mujeres con bajo índice de masa corporal y en personas expuestas al frío²⁶. El patrón es un depósito simétrico supraclavicular, axilar, mediastínico y en regiones paraespinales y pararenales²⁷ (fig. 4). La observación de que estos depósitos se corresponden en la TC con áreas de grasa permite descartar un posible falso positivo. La administración de sedantes o relajantes musculares no ha demostrado disminuir con eficacia la captación fisiológica en la grasa parda²⁸.

La captación en la médula ósea, generalmente, está producida por los factores estimulantes de colonias de granulocitos administrados para reducir la neutropenia asociada a la quimioterapia²⁹, aunque también puede observarse por la existencia de alteraciones hematopoyéticas³⁰ (fig. 5). Cuando esta captación es mayor que la observada en el hígado y es de carácter heterogéneo debe ser considerada patológica³¹.

Los artefactos más habituales ligados a la utilización de la TC son la truncación por movimientos respiratorios, la existencia de implantes metálicos y los derivados de la utilización de contrastes tanto orales como intravenosos.

Los artefactos de truncación se producen debido a que la serie PET obtenida no está corregida por atenuación, y necesita los datos de la TC para corregir la atenuación, y así obtener una serie PET corregida. De esa forma se puede producir el artefacto de truncación si existe diferencia en el tamaño del campo de visión transversal entre la TC (50 cm)

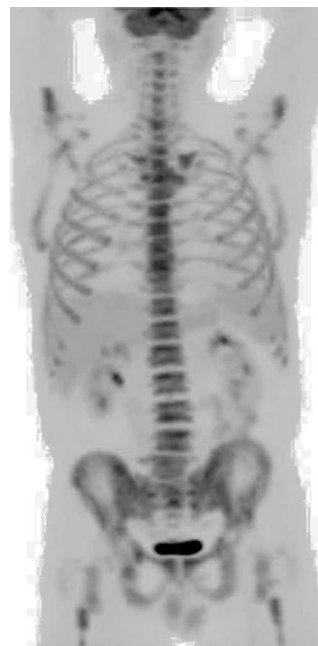


Figura 5 En la reconstrucción MIP de la PET se visualiza una captación difusa y homogénea en la médula ósea, en relación con la toma de colonias estimulantes de granulocitos.

y la PET (70 cm)^{32,33}. Este fenómeno se suele producir en los pacientes obesos y cuando la exploración se realiza con los brazos hacia abajo. Para evitar estos artefactos hay que tratar de realizar el estudio con los brazos por encima de la cabeza. Como consecuencia de este problema se produce una alteración de las imágenes corregidas por atenuación y por tanto de las medidas del *standardized uptake value* (SUV). La observación de las imágenes sin corrección permite descartar los posibles errores.

El artefacto por movimientos respiratorios se produce debido a la diferente posición del tórax entre la imagen obtenida con la TC y con la PET, condicionado por el largo tiempo de adquisición de la PET respecto al de la TC³⁴⁻³⁶. Frecuentemente se observa un área curvilínea de hipoactividad en la interfase diafragma/hígado, lo que dificulta la valoración de lesiones situadas en la base del pulmón derecho o en la cúpula hepática. En estos casos hay que revisar cuidadosamente las imágenes de la TC. Por otro lado, este problema también afecta al cálculo del SUV de las lesiones pulmonares y a la delimitación de los volúmenes para la planificación radioterápica.

Se han propuesto diversas maniobras respiratorias para minimizar este hecho; obviamente, la mejor solución es utilizar sistemas de sincronización (*gating*) respiratoria.

Los artefactos por implantes metálicos suceden como consecuencia de los altos valores de unidades Hounsfield de estos materiales que producen unos altos coeficientes de atenuación en las imágenes PET corregidas, lo que puede conducir a un resultado falso positivo. La observación de las imágenes obtenidas sin corrección de atenuación puede evitar cometer este error³⁷. Una profunda revisión de este problema puede ser consultada en Abdoli³⁸.

Ante la duda de si una captación intestinal puede ser patológica, la práctica más habitual es repetir este campo transcurrido un tiempo (1-2 h) tras una ingesta sólida y/o

líquida; la persistencia de la actividad sugiere enfermedad. Sin embargo, cada vez más se recurre a la utilización de contrastes orales para una mejor delimitación y caracterización de posibles lesiones intestinales³⁹. La utilización de contrastes de alta densidad induce un incremento de los valores de atenuación y, como consecuencia, un posible artefacto en las imágenes corregidas y errores en la interpretación⁴⁰⁻⁴². La revisión de las imágenes PET sin corrección de atenuación o las soluciones tecnológicas automáticas por software, más recientes, permiten descartar estos errores. La mejor solución es utilizar contrastes de baja densidad o neutros que permitan la distensión de la pared sin producir artefactos⁴³⁻⁴⁵.

La utilización de contrastes iv permite una mejor delimitación del tamaño tumoral y de su relación con las estructuras vecinas; también facilita la detección de lesiones de pequeño tamaño o de baja actividad metabólica (bien diferenciados, bajo nivel de proliferación, alto contenido en mucina) y permite descartar posibles falsos positivos ligados a actividad inflamatoria-infecciosa. Por otro lado, contribuye a una mejor visualización de las estructuras en algunas áreas (cuello, pelvis) y, frecuentemente, a una mejor caracterización de las lesiones hepáticas. Por todas estas razones se está imponiendo la utilización sistemática de contrastes intravenosos en la exploración estándar, a pesar de que es evidente que se añaden costes y riesgos (reacciones alérgicas, nefrotoxicidad). La utilización de estos contrastes prácticamente no tiene repercusión en la PET cuando su distribución se produce de forma homogénea en el sistema vascular^{42,46}; sin embargo, sí que se producen interferencias en el caso de acumulación significativa del contraste en determinados órganos, lo que produce un incremento de los valores de atenuación, y por tanto puede conducir a errores en el cálculo de índices semicuantitativos de captación de FDG en dichas áreas, por ejemplo del frecuentemente utilizado SUV⁴². De nuevo, la visualización de las imágenes sin corrección de atenuación y el software comercial (cuyo fundamento se basa en la normalización del valor máximo de la escala Hounsfield) que permite corregir los artefactos causados en la imagen corregida por atenuación debido a la utilización de contrastes radiológicos, permiten descartar posibles errores.

Tomografía por emisión de positrones-resonancia magnética

Esta técnica presenta importantes ventajas sobre la PET-TC, puesto que evita las radiaciones ionizantes de la TC, lo que la haría recomendable en pacientes pediátricos, y dado que ofrece una excelente resolución de contraste para la valoración de los tejidos blandos tiene gran potencia clínica en estudios oncológicos de cabeza y cuello, mama, abdominales y pélvicos. Sin embargo, para el estudio del pulmón, del hueso y de posibles lesiones calcificadas la TC continúa siendo de elección. Por otro lado, la PET-RM todavía tiene problemas por resolver como una adecuada corrección de atenuación, tiempos de exploración que son más largos y su coste elevado⁴⁷, si bien es cierto que en la actualidad se está trabajando para minimizarlos.

En relación con la interferencia que puedan causar los contrastes utilizados en la RM en los estudios cuantitativos

de PET, no parece que estos produzcan cambios significativos en la corrección de atenuación, sobre todo si se utilizan algoritmos de segmentación adecuados. Se precisa de más experiencia para conocer la posible repercusión de los contrastes intravenosos en los estudios dinámicos de PET y la de los contrastes orales ferrosos⁴⁸.

Radioprotección

Los efectos derivados de la utilización de las radiaciones ionizantes se clasifican en estocásticos y no estocásticos. Los efectos no estocásticos son aquellos en los que el daño es proporcional a la dosis recibida, y hay que superar una dosis umbral para que dicho daño aparezca. Estos efectos no se producen cuando se utilizan procedimientos diagnósticos.

Los efectos estocásticos más significativos están ligados a la posible inducción de cáncer; sin embargo, existe en la literatura científica cierta controversia acerca del riesgo derivado de las dosis bajas de radiación, debido a que no existe evidencia experimental de los mismos y las conclusiones están extraídas de la extrapolación de los efectos que se han observado con dosis mucho más altas⁴⁹, y hay un cierto consenso en admitir la conocida como hipótesis lineal sin umbral (LNT) que indica que cualquier cantidad de radiación puede producir un daño sin que exista una dosis umbral. De acuerdo con este planteamiento, existe una directiva de la Comunidad Europea que estipula que todo procedimiento radiológico debe realizarse bajo los principios de justificación (beneficio mayor que riesgo) y de optimización (utilizar dosis tan bajas como sea razonablemente posible, principio ALARA)⁴⁶.

En los procedimientos diagnósticos de la medicina nuclear convencional las dosis recibidas por los pacientes oscilan entre 0,2 y 13 mSv⁵⁰.

En la PET-TC los pacientes reciben del orden de 25 mSv, de los cuales un 70% se deben a la contribución de la TC⁵¹.

Por último, aunque la realización de una PET-RM permite evitar los efectos biológicos derivados de la exposición de los pacientes a las radiaciones ionizantes, hay que tener en cuenta los derivados de la utilización de campos electromagnéticos que son de naturaleza determinista, por lo que se debe definir un umbral de seguridad⁵². Además de las conocidas limitaciones en su uso (claustrofobia, marcapasos, presencia de materiales ferromagnéticos...), los posibles efectos biológicos que pueden presentarse (reacciones cardiovasculares, estimulación de nervios periféricos, incremento de la temperatura corporal) normalmente son poco relevantes. Sin embargo, queda todavía por conocer en profundidad la posible sinergia derivada de estos efectos junto con los derivados de la utilización de compuestos ionizantes^{53,54}.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Bibliografía

1. European Society of Radiology. Clinical audit of standards. Clinical audit-ESR perspective. *Insights Imaging*. 2010;1:21-6.

2. Mirzaei S, Maffioli L, Hilson A. Clinical audit in nuclear medicine. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*. 2011;38:3–4.
3. Farrell MB, Cequeira MD. Understanding appropriate use criteria in nuclear medicine. *J Nucl Med Technol*. 2012;40:81–6.
4. European Society of Radiology. European Association of Nuclear Medicine. Multimodality imaging training curriculum. Parts II and III. *Insights Imaging*. 2012;3:191–6.
5. Prigent A, Huic D, Costa DC. Syllabus for postgraduate specialization in nuclear medicine-2011/2012 update. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*. 2012;39:739–43.
6. Ley 29/2006 de 26 de julio, de garantías y uso racional de los medicamentos y productos sanitarios.
7. Basu S, Alavi A. Unparalleled contribution of ^{18}F -FDG PET to medicine over 3 decades. *J Nucl Med*. 2008;49:17N–21N, 37N.
8. Delbeke D, Martin WH. Positron emission tomography imaging in oncology. *Radiol Clin North Am*. 2001;39:883–917.
9. Kapoor V, Mccook BM, Torok FS. An introduction to PET-CT imaging. *Radiographics*. 2004;24:523–43.
10. Warburg O, Wind F, Negelein E. The metabolism of tumors in the body. *J Gen Physiol*. 1927;8:519–30.
11. Kubota R, Yamada S, Kubota K, Ishiwata K, Tamahashi N, Ido T. Intratumoral distribution of fluorine-18-fluorodeoxyglucose in vivo: High accumulation in macrophages and granulation tissues studied by microautoradiography. *J Nucl Med*. 1992;33:1972–80.
12. Paik JY, Lee KH, Choe YS, Choi Y, Kim BT. Augmented ^{18}F -FDG uptake in activated monocytes occurs during the priming process and involves tyrosine kinases and protein kinase. *C J Nucl Med*. 2004;45:124–8.
13. Rosenbaum S, Lind T, Antoch G, Bockisch A. False-Positive FDG PET Uptake: the role of PET/CT. *Eur Radiol*. 2006;16:1054–65.
14. Lee M, Ramaswamy MR, Lilien DL, Nathan CA. Unilateral vocal cord paralysis causes contralateral false-positive positron emission tomography scans of the larynx. *Ann Otol Rhinol Laryngol*. 2005;114:202–6.
15. Liu Y. Clinical significance of thyroid uptake on F-18-fluorodeoxyglucose positron emission tomography. *Ann Nucl Med*. 2009;23:17–23.
16. Choi JY, Lee KS, Kim HJ, Shim YM, Kwon OJ, Park K, et al. Focal thyroid lesions incidentally identified by integrated ^{18}F -FDG PET/CT: Clinical significance and improved characterization. *J Nucl Med*. 2006;47:609–15.
17. Brink I, Reinhardt MJ, Hoegerle S, Althoefer C, Moser E, Nitzsche EU. Increased metabolic activity in the thymus gland studied with ^{18}F -FDG PET: Age dependency and frequency after chemotherapy. *J Nucl Med*. 2001;42:591–5.
18. Kaneta T, Hakamatsuka T, Takanami K, Yamada T, Takase K, Sato A, et al. Evaluation of the relationship between physiological FDG uptake in the heart and age, blood glucose level, fasting period, and hospitalization. *Ann Nucl Med*. 2006;20:203–8.
19. Tatlidil R, Jadvar H, Bading JR, Conti PS. Incidental colonic fluorodeoxyglucose uptake: Correlation with colonoscopic and histopathologic findings. *Radiology*. 2002;224:783–7.
20. Liu Y. Clinical significance of diffusely increased splenic uptake on FDG-PET. *Nucl Med Commun*. 2009;30:763–9.
21. Liu Y. Benign ovarian and endometrial uptake on FDG PET-CT: Patterns and pitfalls. *Ann Nucl Med*. 2009;23:107–12.
22. Lerman H, Metser U, Grisaru D, Fishman A, Lievshitz G, Even-Sapir E. Normal and abnormal ^{18}F -FDG endometrial and ovarian uptake in pre- and postmenopausal patients: Assessment by PET/CT. *J Nucl Med*. 2004;45:266–71.
23. Bar-Shalom R. Muscle uptake of 18-fluorine fluorodeoxyglucose. *Semin Nucl Med*. 2000;30:306–9.
24. Roy FN, Beaulieu S, Boucher L, Bourdeau I, Cohade C. Impact of intravenous insulin on ^{18}F -FDG PET in diabetic cancer patients. *J Nucl Med*. 2009;50:178–83.
25. Yeung HW, Grewal RK, Gonen M, Schöder H, Larson SM. Patterns of (^{18}F) -FDG uptake in adipose tissue and muscle: A potential source of false-positives for PET. *J Nucl Med*. 2003;44:1789–96.
26. Garcia CA, Van Nostrand D, Atkins F, Acio E, Butler C, Esposito G, et al. Reduction of brown fat 2-deoxy-2-[^{18}F]fluoro-D[r]-glucose uptake by controlling environmental temperature prior to positron emission tomography scan. *Mol Imaging Biol*. 2006;8:24–9.
27. Hany TF, Gharehpapagh E, Kamel EM, Buck A, Himms-Hagen J, von Schulthess GK. Brown adipose tissue: A factor to consider in symmetrical tracer uptake in the neck and upper chest region. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*. 2002;29:1393–8.
28. Coronado M, Couto RM, Rodado S, Marin Curto LM. Semiología de la PET/TAC con ^{18}F -FDG. *Rev Esp Med Nucl*. 2008;27:284–306.
29. Yao WJ, Hoh CK, Hawkins RA, Glaspy JA, Weil JA, Lee SJ, et al. Quantitative PET imaging of bone marrow glucose metabolic response to hematopoietic cytokines. *J Nucl Med*. 1995;36:794–9.
30. Inoue K, Okada K, Harigae H, Taki Y, Goto R, Kinomura S, et al. Diffuse bone marrow uptake on F-18 FDG PET in patients with myelodysplastic syndromes. *Clin Nucl Med*. 2006;31:721–3.
31. Inoue K, Goto R, Okada K, Kinomura S, Fukuda H. A bone marrow F-18 FDG uptake exceeding the liver uptake may indicate bone marrow hyperactivity. *Ann Nucl Med*. 2009;23:643–9.
32. Carney J, Townsend DW, Kinahan PE, Beyer T, Kachelriess M, Kalender WA. CT-based attenuation correction: the effects of imaging with the arms in the field of view [abstract]. *J Nucl Med*. 2001;42 Suppl:56P–7P.
33. Mawlawi O, Erasmus JJ, Pan T, Cody DD, Campbell R, Lonn AH, et al. Truncation artifact on PET/CT: Impact on measurements of activity concentration and assessment of a correction algorithm. *AJR*. 2006;186:1458–67.
34. Osman MM, Cohade C, Nakamoto Y, Wahl RL. Respiratory motion artifacts on PET emission images obtained using CT attenuation correction on PET-CT. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*. 2003;30:603–6.
35. Cohade C, Osman M, Marshall LN, Wahl RL. PET-CT: Accuracy of PET and CT spatial registration of lung lesions. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*. 2003;30:721–6.
36. Von Schulthess GK. Normal PET and PET/CT body scans: Imaging pitfalls and artifacts. En: Von-Schulthess GK, editor. *Clinical molecular anatomic imaging: PET, PET/CT and SPECT/CT*. Baltimore, MD: Lippincott, Williams & Wilkins; 2002. p. 252–60.
37. Goerres GW, Ziegler SI, Burger C, Berthold T, von Schulthess GK, Buck A. Artifacts at PET and PET/CT caused by metallic hip prosthetic material. *Radiology*. 2003;226:577–84.
38. Abdoli M, Dierckx R. Metal artifact reduction strategies for improved attenuation correction in hybrid PET/CT imaging. *Med Phys*. 2012;39:3343–61.
39. Antoch G, Freudenberger LS, Beyer T, Bockisch A, Debatin JF. To enhance or not to enhance? ^{18}F FDG and CT contrast agents in dual-modality ^{18}F FDGPET/CT. *J Nucl Med*. 2004;45 Suppl 1:56S–65S.
40. Groves AM, Kayani I, Dickson JC, Townsend C, Croasdale I, Syed R, et al. Oral contrast medium in PET/CT: Should you or shouldn't you? *Eur J Nucl Med Mol Imaging*. 2005;32:1160–6.
41. Cohade C, Osman M, Nakamoto Y, Marshall LT, Links JM, Fishman EK, et al. Initial experience with oral contrast in PET/CT: Phantom and clinical studies. *J Nucl Med*. 2003;44:412–6.
42. Antoch G, Jentzen W, Freudenberger LS, Statta J, Mueller SP, Debatin JF, et al. Effect of oral contrast agents on computed tomography-based positron emission tomography attenuation correction in dual-modality positron emission tomography/computed tomography imaging. *Invest Radiol*. 2003;38:784–9.

43. Dizendorf EV, Treyer V, Von Schulthess GK, Hany TF. Application of oral contrast media in coregistered positron emission tomography-CT. *AJR*. 2002;179:477-548.
44. Antoch G, Kuehl H, Kanja J, Lauenstein TC, Schneemann H, Hauth E, et al. Dual-modality PET/CT scanning with negative oral contrast agent to avoid artifacts: Introduction and evaluation. *Radiology*. 2004;230:879-85.
45. Prabhakar HB, Sahani DV, Fischman AJ, Mueller PR, Blake MA. Bowel hot spots at PET-CT. *RadioGraphics*. 2007;27:145-59.
46. Mansi L, Ciarmiello A, Cuccurullo V. PET/MRI and the revolution of the third eye. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*. 2012;39:1519-24.
47. Lois C, Bezrukov I, Schmidt H, Schwenzer N, Werner M, Kupferschläger J, et al. Effect of MR contrast agents on quantitative accuracy of PET in combined whole-body PET/MR imaging. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*. 2012;39:1756-66.
48. Committee to assess health risks from exposure to low levels of ionizing radiation, National Research Council. Health risks from exposure to low levels of ionizing radiation: BEIR VII Phase 2. Washington, DC: The National Academies Press; 2006.
49. Council of the European Union. Council directive 97/43/Euratom of 30 June 1997 on health protection against the dangers of ionizing radiation in relation to medical exposure, and repealing Directive 84/466/Euratom. Document 397L0043. Official Journal NO. L 180, 09/07/1997; 1997. p. 22-7.
50. NCRP. Sources and magnitude of occupational and public exposures from nuclear medicine procedures: Recommendations of the National Council on radiation protection and measurements. NCRP Report n.º 124. Bethesda, MD: National Council on Radiation Protection and Measurements; 1996.
51. Brix G, Lechel U, Glatting G, Ziegler SI, Munzing W, Muller SP, et al. Radiation exposure of patients undergoing whole-body dualmodality ¹⁸F-FDG PET/CT examinations. *J Nucl Med*. 2005;46:608-13.
52. International commission on non-ionizing radiation protection. General approach to protection against non-ionizing radiation. *Health Phys*. 2002;82:540-8.
53. Hintenlang DE. Synergistic effects of ionizing radiation and 60 Hz magnetic fields. *Bioelectromagnetics*. 1993;14:545-51.
54. Koyama S, Nakahara T, Sakurai T, Komatsubara Y, Isozumi Y, Miyakoshi J. Combined exposure of ELF magnetic fields and xrays increased mutant yields compared with x-rays alone in pTN89 plasmids. *J Radiat Res*. 2005;46:257-64.