

José María Yturralde. Serie *Postludio*, 2006. Acrílico sobre lienzo, 41x41 cm.

# HACIENDO VISIBLE LO INVISIBLE

## TÉCNICAS DE DIAGNÓSTICO POR IMAGEN

Magdalena Rafecas López, Martín Roos y Maximiliano Lloret Llorens

*Making the Invisible Visible. Diagnostic Imaging Techniques.*

In Medicine, images play a decisive role, especially in Diagnostics. Several properties of the inner body can be visualized and measured by means of so-called Medical Imaging techniques. Most of these techniques are based on detection by electromagnetic radiation with radiation energy depending on the properties of the image. If the goal is to obtain a three-dimensional image, complex mathematical algorithms combined with powerful computers must be used in addition to suitable detector devices. Therefore, progress in Medical Imaging is the result of a combined effort by physicians and physicists, as well as chemists, biologists, engineers, mathematicians and computer scientists.

«Una imagen vale más que mil palabras.» Si aplicáramos esta frase al mundo de las radiaciones, podríamos asegurar que, en muchos casos, «una imagen vale más que mil exploraciones». En el entorno médico incluso podríamos ir más lejos y aseverar que ciertas imágenes médicas «valen más que mil intervenciones quirúrgicas». La detección de la radiación para visualizarla posteriormente en forma de imagen se emplea en numerosos campos, por ejemplo en la industria del motor para controles de calidad, o en astrofísica, para realizar mapas del firmamento. Pero es en la medicina donde la ciencia y la tecnología de la imagen han encontrado más resonancia y aplicación.

### ■ EL VALOR AÑADIDO DE LAS IMÁGENES EN MEDICINA

El valor de las imágenes médicas es múltiple: permiten al médico reconocer las alteraciones asociadas a ciertas enfermedades como el Alzheimer, mucho antes de que las exploraciones convencionales ofrezcan pruebas concluyentes. También posibilitan que el diagnóstico emitido sea más preciso, y que el paciente se ahorre otro tipo de exploraciones más molestas o incluso una operación.

Las imágenes que se obtienen mediante métodos de diagnóstico por imagen son, hoy en día, una herramienta muy apreciada en la rutina clínica. Con una radiografía

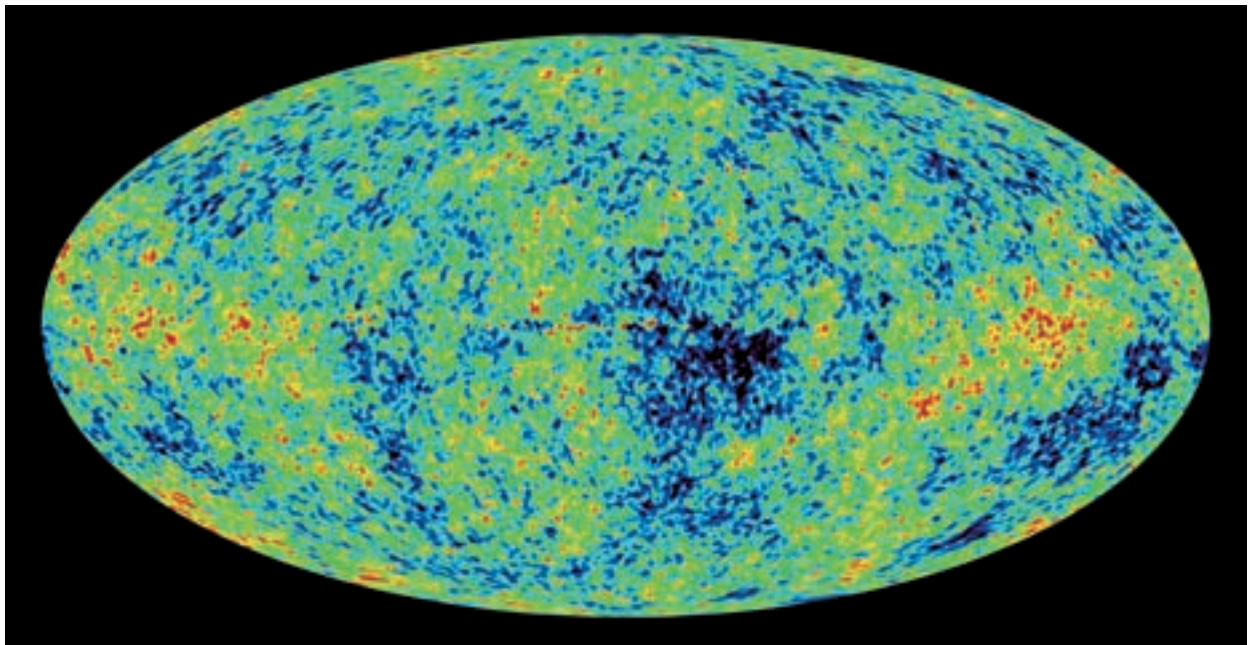
en la mano, al experto en diagnóstico le es fácil determinar si un hueso está roto, y por dónde y cómo lo está. El diagnóstico sería mucho más impreciso si esa información tuviera que obtenerse a través de palpaciones, y más doloroso y peligroso si hubiera que intervenir al paciente para ver la rotura. Las imágenes permiten, además, realizar una planificación terapéutica previa.

Aunque hoy en día existen muchas técnicas de diagnóstico por imagen, la radiografía es la técnica veterana y una de las más asequibles. Gracias al descubrimiento de los rayos X, por primera vez el interior del cuerpo humano se hizo accesible a los ojos de los médicos sin necesidad de usar el bisturí. La utilidad de los rayos X para el diagnóstico se hizo patente en seguida, ya que esta radiación invisible, tras atravesar el cuerpo humano y llegar a una placa fotográfica, retrataba la estructura ósea de la zona atravesada.

Con la radiografía se afianza el matrimonio entre la medicina y la física, alianza a la que se le han ido uniendo otras ciencias y tecnologías para dar lugar al campo multidisciplinar del diagnóstico médico por la imagen.

Nuevos descubrimientos y un mayor conocimiento de la física han dado paso al desarrollo de técnicas más complejas y espectaculares, tales como la resonancia magnética (RM) o la tomografía por emisión de positro-

**«LAS IMÁGENES MÉDICAS  
POSIBILITAN QUE EL  
DIAGNÓSTICO EMITIDO SEA  
MÁS PRECISO Y QUE EL  
PACIENTE SE AHORRE OTRO  
TIPO DE EXPLORACIONES  
MÁS MOLESTAS»**



Mapa de la radiación de fondo de microondas del universo (datos procedentes de los satélites COBE y MAP, Universidad de Princeton, EE UU).

nes (PET en sus siglas en inglés). Los principios físicos de estas dos técnicas son muy distintos: mientras que la resonancia magnética se basa en el efecto de campos electromagnéticos variables en los átomos de hidrógeno del organismo, la tomografía por emisión de positrones utiliza la radiación procedente de la aniquilación de un electrón del cuerpo humano con su antipartícula, el positrón.

Una característica común a casi todas las técnicas de diagnóstico por imagen es que la información en la que estamos interesados nos llega a través de «mensajeros imperceptibles»: no los vemos, ni los oímos, ni los sentimos. Para poder «atraparlos», necesitaremos sistemas especialmente concebidos para ello. Dependiendo del tipo de «mensajero» (ondas sonoras, radiación electromagnética, etc.), el dispositivo será diferente, así como el tipo de información que podremos extraer.

Esta información es selectiva, es decir, pone de manifiesto determinadas propiedades del organismo. En el caso de la radiografía, la propiedad en cuestión es la «opacidad» del cuerpo a la radiación o, dicho de otro modo, su capacidad de «frenar» los rayos X. Esta propiedad, a su vez, nos informa sobre la densidad de los diferentes órganos que esos rayos X han atravesado. La imagen de rayos X es por tanto un «mapa de

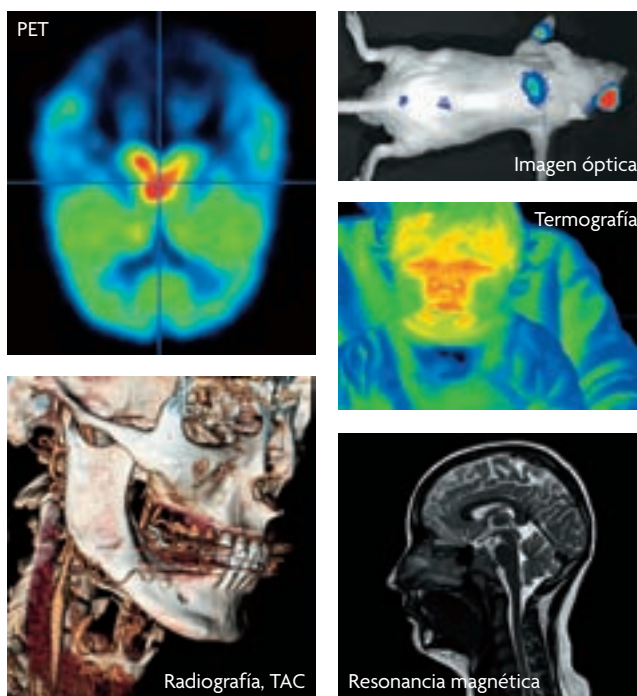
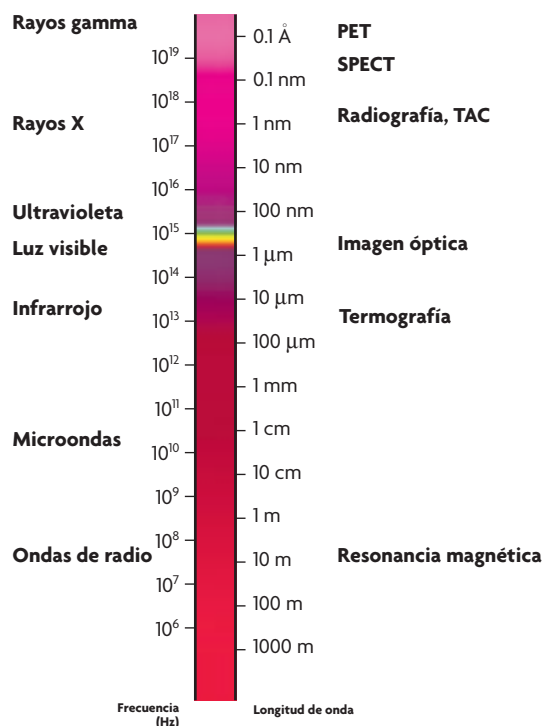
densidades» que refleja la anatomía del paciente. Si se trata de ecografía, los mensajeros son ultrasonidos, ondas sonoras imperceptibles al oído humano. Estos ultrasonidos son emitidos por un pequeño altavoz; tras «rebotar» en las superficies exteriores de los órganos o donde la estructura de éstos cambia, igual que hace el eco en las paredes de un acantilado, los ultrasonidos son recogidos por un receptor.

Según sea la energía que las caracteriza, las radiaciones electromagnéticas nos proporcionan un amplio espectro de «mensajeros» y, por tanto, de información. Debido a la naturaleza dual de la radiación, el tipo de «mensajero» se comportará como onda o como corpúsculo (fotón) dependiendo sobre todo de su energía.

A excepción de la endoscopia, las imágenes que obtenemos no corresponden a aquello que el médico podría ver si se decidiera a operar al paciente; aunque los ojos de los humanos se comporten como «detectores de

radiación electromagnética», son sólo sensibles a una muy reducida parte del espectro electromagnético, esto es, a la luz visible. Pero si, por ejemplo, nuestros ojos fueran capaces de percibir radiación infrarroja, las imágenes que el médico vería serían aquellas que nos ofrece la termografía. Esta técnica, aún en fase de investigación, proporciona «mapas de calor»; me-

**«AUNQUE HOY EN DÍA  
EXISTEN MUCHAS TÉCNICAS  
DE DIAGNÓSTICO POR  
IMAGEN, LA RADIOGRAFÍA  
ES LA TÉCNICA VETERANA  
Y UNA DE LAS MÁS  
ASEQUIBLES»**



El tipo de aplicación de las radiaciones electromagnéticas al diagnóstico médico por imagen depende de la energía de la radiación o, lo que es lo mismo, de su frecuencia (proporcional a la energía) o de su longitud de onda (inversamente proporcional a la frecuencia).

dian­te estos mapas se puede detectar la presencia de ciertos tumores, ya que éstos suelen emitir más calor (en forma de rayos infrarrojos) que el tejido circundante.

Otros mensajeros invisibles son los rayos gamma, que constan de fotones de alta energía y que proceden de desintegraciones radiactivas ocurridas en el interior del organismo. Las desintegraciones no proceden de los núcleos atómicos propios del cuerpo humano, sino de los núcleos de determinados compuestos radiactivos, llamados radiofármacos, que previamente se le han administrado al paciente en cantidades muy pequeñas. Los radiofármacos son sustancias radiactivas especialmente diseñadas para que el organismo no las pueda distinguir de aquellas que está acostumbrado a metabolizar, como la glucosa, el agua o el amoníaco. Son como espías infiltrados, que informan al exterior sobre su localización mediante la emisión de radiación. Su posición, a su vez, está relacionada con el metabolismo de la sustancia natural que imitan, de modo que lo que vemos en la imagen final da cuenta del funcionamiento del cuerpo en relación a cierta función metabólica.

**«EN LAS TÉCNICAS DE DIAGNÓSTICO POR IMAGEN, LA INFORMACIÓN NOS LLEGA MEDIANTE “MENSAJEROS IMPERCEPTIBLES”: NI LOS VEMOS, NI LOS ESCUCHAMOS, NI LOS SENTIMOS»**

#### ■ RECONSTRUCCIÓN DE LA IMAGEN

El proceso de creación de la imagen a partir de los datos medidos depende de si el objetivo final es una imagen plana o una imagen tomográfica. Las imágenes planas se obtienen de forma similar a una fotografía, es decir, directa o casi directamente a partir de la medición. Ejemplos de imágenes planas son las obtenidas mediante radiografía, ecografía o termografía.

radiografía, ecografía o termografía.

Para obtener cortes transversales o longitudinales del cuerpo o reproducir volúmenes enteros (imágenes tridimensionales o 3D), se emplean técnicas tomográficas. La complejidad de estas técnicas no radica solamente en la tecnología asociada a la emisión y detección de ondas o partículas, sino también en el llamado proceso de «reconstrucción de la imagen». Esta tarea equivale a la de un detective que, con pocas pruebas, intenta determinar el escenario del crimen e identificar al asesino.

Las «pruebas» con las que cuentan las técnicas tomográficas suelen ser imágenes planas obtenidas bajo diversos ángulos y orientaciones. Los «detectives» son al-

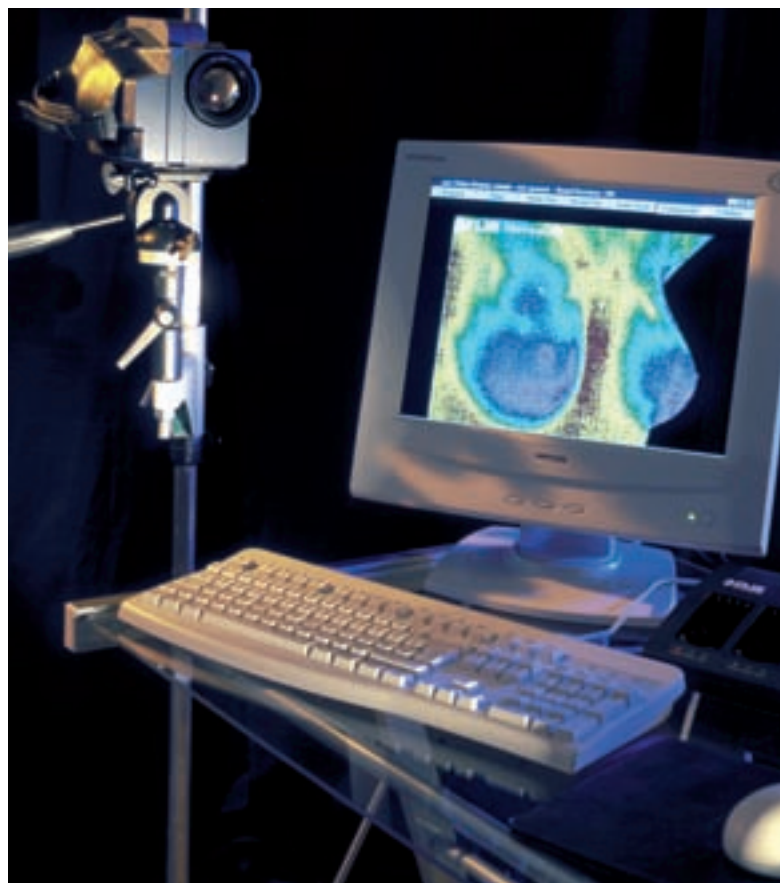
goritmos matemáticos; y la «lupa», manteniendo las similitudes, serían los potentes ordenadores que se encargan de realizar los cálculos.

La tomografía puede ir asociada a casi cualquier técnica de imágenes planas. Por ejemplo, la detección de rayos X es tanto la base de la radiografía como de la tomografía axial computarizada, también conocida como TAC o TC. Lo mismo ocurre si la base de la técnica son ultrasonidos: ecografía 2D (plana) y 3D (tomografía); o radiación procedente de la desintegración de un radioisótopo emisor de rayos gamma: gammagrafía (plana) y tomografía por emisión de un único fotón (SPECT en sus siglas en inglés). También existen técnicas tomográficas sin paralelo en el mundo de las imágenes planas, como la PET.

El proceso de reconstrucción de la imagen es muy complicado, sobre todo porque al detective le falta información ya que no existe el detector perfecto, y porque parte de la información se ha perdido en su camino hasta nosotros. Además, ciertos efectos físicos deterioran la calidad de dicha información. La mayoría de los fenómenos de degradación de la imagen radican en la misma naturaleza de la propagación de la radiación a través de la materia. Por ejemplo, los implantes de metal que lleve un paciente producirán distorsiones en las imágenes de resonancia magnética. Un fenómeno de degradación importante en TC, PET y SPECT es la desviación en la dirección de propagación que sufren los fotones tras colisionar con los átomos del cuerpo humano. Esto se traduce en un posible emborronamiento de la imagen y falseamiento de la información que ésta contiene. Otras causas de degradación radican en los propios aparatos de detección, y pueden estar relacionadas con imperfecciones de los componentes electrónicos o de los materiales empleados.

Gracias al conocimiento de los fenómenos físicos subyacentes a la formación y degradación de la imagen, los científicos han desarrollado métodos para compensar, corregir o reducir los efectos de degradación. Estos métodos pueden aplicarse a distintos niveles: antes, durante o después de la reconstrucción. En algunos casos se puede prevenir la degradación de la imagen mediante el uso de modelos físicos integrados en el algoritmo de reconstrucción. Un ejemplo de ello es el fenómeno de atenuación de los rayos gamma en el interior del cuerpo humano tras ser emitidos por un radioisótopo (SPECT) o tras la aniquilación del positrón (PET): a los detectores les llegan menos fotones de los que cabría esperar

**«LOS RADIOFÁRMACOS SON  
COMO ESPÍAS INFILTRADOS  
QUE INFORMAN AL  
EXTERIOR SOBRE SU  
LOCALIZACIÓN MEDIANTE  
LA EMISIÓN DE RADIACIÓN»**



Equipo para termografía: en la pantalla del ordenador se visualiza la radiación infrarroja detectada por una cámara especialmente diseñada para detectar el cáncer de mama.

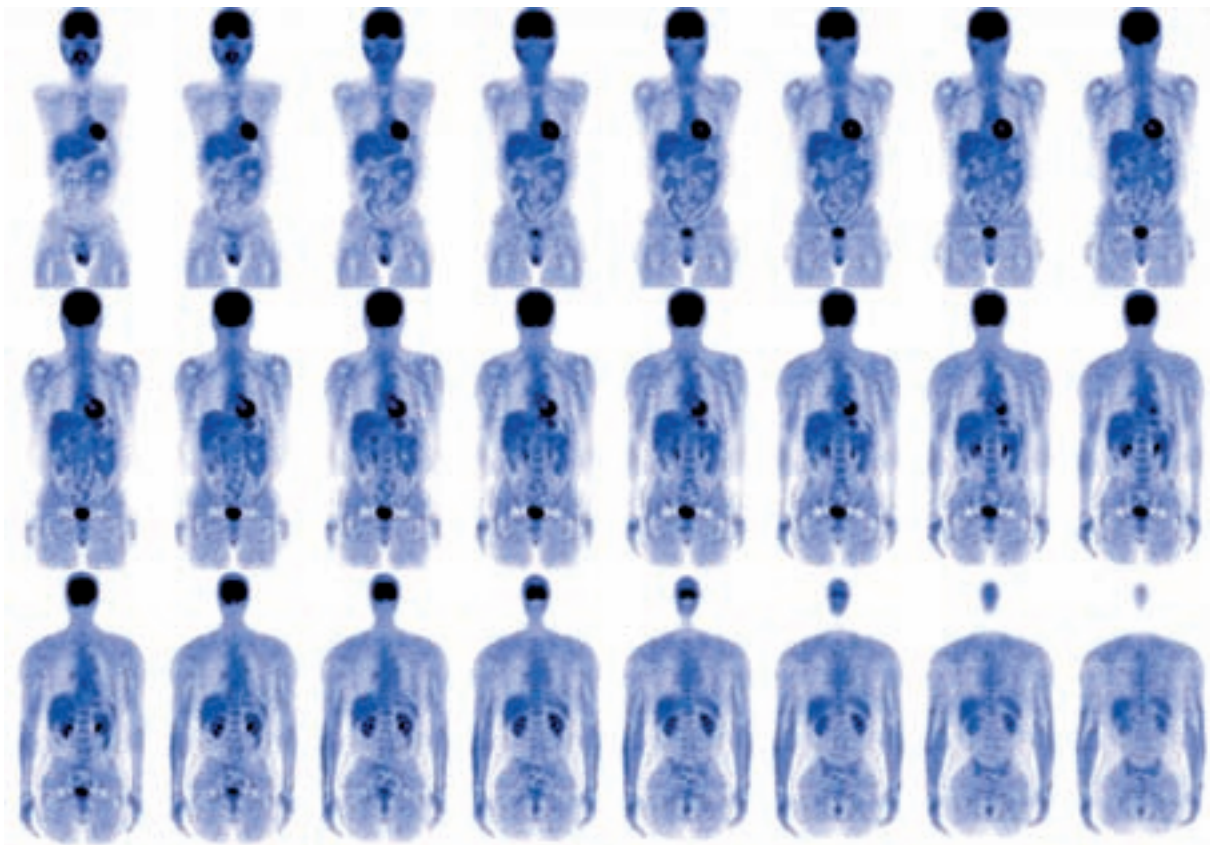
dada cierta distribución de radiactividad en el sujeto. La razón es que muchos fotones son absorbidos en el cuerpo del paciente por culpa del efecto fotoeléctrico, muchos otros, tras una interacción por efectos Compton, se desvían de su trayectoria original. Estos dos fenómenos conducen a que se pierda información. Sin embargo, si conocemos la anatomía de la región

bajo estudio (por ejemplo, gracias a una imagen de TC previa), esta pérdida de información se puede estimar y compensar.

En los procesos de detección y reconstrucción de la imagen están involucrados físicos, ingenieros, informáticos y matemáticos. Una vez la imagen ha sido creada, interpretarla es tarea del médico especialista en radiodiagnóstico o en medicina nuclear.

**■ TERAPIA Y CIRUGÍA GUIADAS POR LA IMAGEN**

Gracias a los avances científicos y tecnológicos de las últimas décadas, los equipos de diagnóstico médico se



Secciones longitudinales procedentes de una imagen tridimensional de tomografía por emisión de positrones (PET). Estudio realizado con fluorodeoxiglucosa para estudiar la posible existencia de metástasis en un paciente con melanoma.

han hecho indispensables en todos los hospitales, y su empleo va más allá del propio diagnóstico. Por ejemplo, mediante determinadas técnicas de imagen, como la resonancia magnética o la tomografía por emisión de positrones, el médico puede determinar si una terapia contra el cáncer es efectiva en su paciente o no. Al disponer de esas tecnologías, el tiempo requerido para averiguar la efectividad de ciertas terapias es mucho menor, lo que permite aumentar las posibilidades de curación del paciente y evitarle efectos secundarios innecesarios o tratamientos inadecuados.

Otro campo en donde las imágenes médicas son fundamentales es en radioterapia. Este tipo de terapia persigue la destrucción de células tumorales mediante la irradiación del paciente. Para planificar la intensidad y la distribución espacial de la radiación es necesario contar con imágenes del interior del paciente que muestren con alta precisión la localización del tumor y la de los órganos de riesgo; a partir de estas imágenes se realizan mapas de la zona a irradiar y de las que han de ser protegidas.

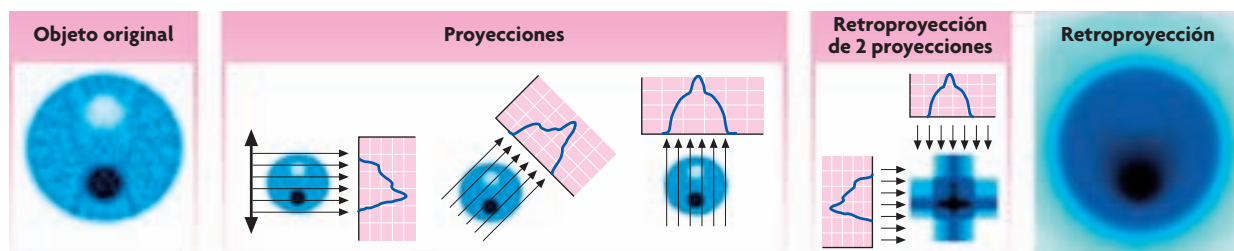
Al inicio de este artículo decíamos que los métodos de diagnóstico por imagen pueden evitar algunas intervenciones quirúrgicas innecesarias; también es cierto

que las imágenes pueden apoyar al cirujano durante su tarea. Se trata de la llamada cirugía guiada por la imagen. Mediante aparatos especialmente concebidos para ese fin, el profesional puede ver en una pantalla el lugar en el que se encuentra su bisturí en relación al objeto de su operación. En el caso del cáncer, también puede ver si, una vez extirpado cierto tumor, quedan células cancerígenas residuales en la zona.

#### ■ EL MUNDO DIGITAL

Aunque en la radiografía tradicional aún se emplea un soporte físico (la placa fotográfica), lo cierto es que en la mayoría de los centros hospitalarios se ha pasado a la radiología digital, es decir, las imágenes se producen directamente en soporte digital, lo que facilita, entre otras cosas, el envío a las consultas o a otros hospitales a través de la red informática y el almacenamiento. Digitales son también las imágenes que se obtienen mediante la PET, la TC, o la RM, entre otras.

El mundo invisible y continuo aparece visible y discretizado en la pantalla del ordenador. La información contenida en la imagen se representa mediante niveles de intensidad asociados a píxeles (del inglés, *picture ele-*



El método más sencillo para reconstruir una sección bidimensional de un objeto es la retroproyección. Una proyección corresponde, en este ejemplo, al perfil que obtenemos al sumar el contenido de cada píxel a lo largo de rectas paralelas, orientadas bajo determinado ángulo (0, 45 y 90 grados en el ejemplo del segundo recuadro). «Retroproyectar» significa «esparcir» los valores de los perfiles a lo largo de las distintas líneas que componen la proyección, asignando ese valor a cada píxel de la línea. La intensidad de cada píxel corresponde, pues, a la suma de los valores de las rectas retroproyectadas que pasan por dicho píxel. En el tercer recuadro se han retroproyectado solamente las proyecciones obtenidas a 0 y 90 grados. La imagen obtenida está todavía muy alejada de la original. Si son numerosas proyecciones las empleadas en la retroproyección (último recuadro), la imagen reconstruida se asemeja más a la original. Este método no se usa en la rutina clínica.

ment). Un píxel es la unidad más pequeña de la que se compone una imagen bidimensional. Si se trata de imágenes tridimensionales hablamos de vóxeles (*volumetric pixel*). La información asociada a un píxel o vóxel es un número que corresponde a la intensidad con la que ese elemento de volumen será representado en la pantalla. Si se trata de técnicas de diagnóstico por la imagen cuantitativas, como la PET, ese número está directamente relacionado con la concentración espacial del radioisótopo bajo estudio en esa región de la imagen.

Dado un volumen espacial concreto, cuanto mayor es el número de vóxeles empleado para representarlo, mayor será la resolución espacial de la imagen, lo cual se traduce en mayor definición y nitidez. Por desgracia el número de vóxeles máximo viene limitado por la física y la geometría de los componentes del escáner empleado. Cada aparato se caracterizará, entre otras propiedades, por su resolución intrínseca, y ésta condicionará el número de vóxeles a emplear. Si usamos menos vóxeles de los que el escáner permite estaremos perdiendo información, y «suavizando» la imagen. Si son más, no ganaremos nada salvo una mayor cantidad de datos a almacenar y, en algunos casos, un aumento del ruido de fondo.

La información contenida en una imagen digital se puede visualizar de muchas maneras. Lo más habitual es trabajar con cortes en varias direcciones. Una misma imagen se puede representar en tonos grises o en colores: a cada vóxel se le asocia un nivel de gris o un color de acuerdo con la intensidad de dicho vóxel y con una escala; las escalas pueden ser de tipo logarítmico o lineal. Aunque la intensidad de cada vóxel es una magnitud objetiva, la percepción de la imagen dependerá mucho del manejo de las escalas de colores y de la pericia del observador. Una escala de color inadecuada puede resaltar detalles sin importancia u ocultar lesiones al no poder ser éstas diferenciadas del fondo que las rodea.

De ahí que la experiencia del médico sea fundamental a la hora de interpretar una imagen.

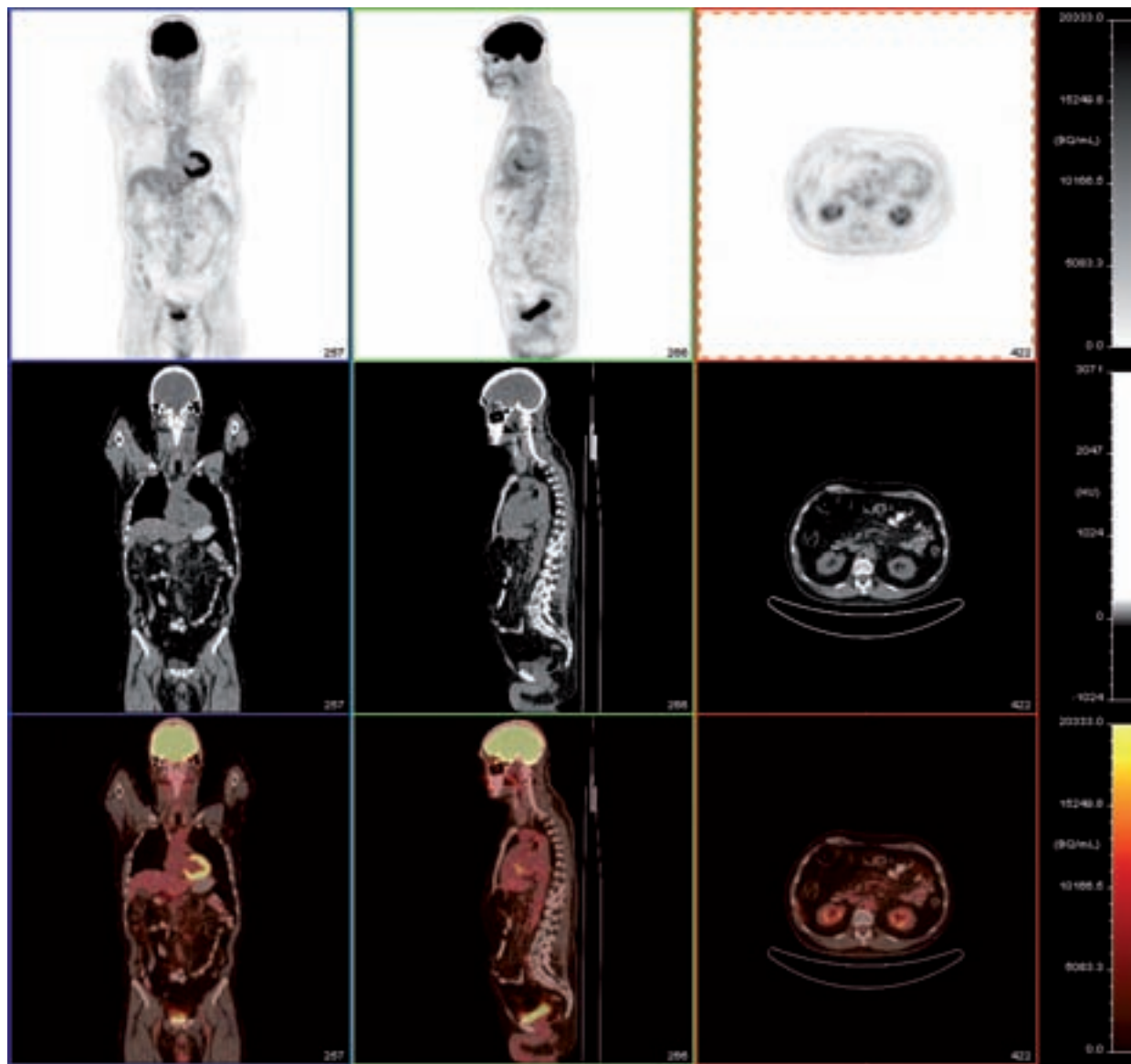
#### ■ EN LA CUARTA DIMENSIÓN

Cada vez más clínicas ginecológicas ofrecen ecografías 4D a las mujeres embarazadas. Esa cuarta dimensión no es más que la dimensión temporal. En vez de una imagen volumétrica obtenida en un determinado momento, al añadir el factor tiempo lo que obtenemos es una película. Esta cuarta dimensión es sobre todo muy útil a la hora de estudiar la variación de ciertas propiedades o sustancias a lo largo del tiempo. Esto, a su vez, permite a los científicos profundizar sus conocimientos sobre ciertas funciones metabólicas.

#### ■ LA UNIÓN HACE LA FUERZA

Hemos comentado que la energía de la radiación electromagnética empleada determina el tipo de información que se obtiene a partir de la imagen. Si bien las estructuras anatómicas se pueden representar muy bien mediante TAC o resonancia magnética, el estudio de la bioquímica del organismo requiere técnicas como la PET o la SPECT, llamadas «funcionales» porque con ellas podemos visualizar ciertas funciones metabólicas de los seres vivos. Por ello, los métodos de imagen anatómica e imagen funcional no deben verse como competidores, sino como complementarios.

Las imágenes funcionales se caracterizan por ser muy específicas, es decir, muestran sólo las zonas en donde ciertos procesos metabólicos están ocurriendo; sin embargo, con frecuencia falta el marco anatómico que permita al especialista localizar con precisión el lugar en cuestión. Por ello, cada vez es más frecuente visualizar como una única imagen aquellas obtenidas mediante dos modalidades distintas. Este proceso (coregistrado o fu-



Fusión de imágenes procedentes de un escáner que combina la TC y la PET. Las imágenes superiores corresponden a la PET, las intermedias a la TC, y las inferiores a la fusión de ambas. En estas últimas se emplea el color para resaltar la información funcional (PET) sobre el marco anatómico (TC), representado en blanco y negro.

sión de imágenes) se realiza mediante programas por ordenador basados en algoritmos matemáticos.

#### ■ DIAGNÓSTICO ASISTIDO POR ORDENADOR

Normalmente una inspección visual de las imágenes es suficiente para emitir un diagnóstico. Sin embargo, algunas técnicas o patologías pueden requerir un análisis más detallado y cuantitativo, a base de calcular las intensidades en determinadas regiones de interés. Un paso más allá lo da el llamado diagnóstico asistido por ordenador: mediante programas informáticos se analizan las

imágenes de forma automática o semiautomática, con la meta de encontrar lesiones o alteraciones de los tejidos, tales como tumores o microcalcificaciones.

El diagnóstico asistido por ordenador no pretende sustituir el «ojo clínico» del médico, sino facilitarle la tarea; pues por mucho que «una imagen valga más que mil palabras», sin duda es el médico y no la imagen quien tiene la última palabra. ☺

**Magdalena Rafecas López.** Institut de Física Corpuscular (IFIC), Centro mixto CSIC – Universitat de València.

**Martin Roos.** Im Focus Onkologie, Urban & Vogel GmbH, Munich.

**Maximiliano Lloret Llorens.** Hospital Universitario La Fe, Valencia.