

Imagenología y detectores en medicina

LA IMAGENOLÓGÍA ES UNA DISCIPLINA DE LA MEDICINA QUE EMPLEA DIFERENTES MODALIDADES DE IMÁGENES DEL CUERPO HUMANO, OBTENIDAS MEDIANTE UN CONJUNTO DE EQUIPOS Y MÉTODOS PARA LLEGAR EN FORMA RÁPIDA Y SEGURA A LA DETECCIÓN DE MUCHAS ENFERMEDADES; ES UNA HERRAMIENTA IMPRESCINDIBLE PARA LA ATENCIÓN ADECUADA Y CALIFICADA DE LOS PACIENTES.

Luis Manuel Montaña Zetina

Es sorprendente el avance que ha tenido la medicina en las últimas décadas. Este avance es notorio al ver cómo ha mejorado la salud en el mundo. No pasan más de un par de generaciones para notar estos logros. Aquellas enfermedades que nuestros padres o abuelos padecían y cuyo medicamento no existía, ahora se han controlado e inclusive erradicado. Es cierto que surgen nuevos males, pero continúa el esfuerzo de médicos e investigadores para enfrentarlos y vencerlos.

Entre los métodos y estrategias que se han adoptado para vencer los males de antaño y atacar los que han surgido últimamente está el de aprovechar los avances científicos y tecnológicos dentro de los centros de salud. De esto y más se hablará en este documento. Para empezar, se tratará el tema de la imagenología, un concepto que de alguna manera es familiar al público en general. Una imagen por radiografía, ultrasonido o resonancia magnética nuclear se ha vuelto parte de la vida cotidiana y ha tomado un papel importante en la cura de muchas enfermedades.

La imagenología comprende la realización de todo tipo de exámenes diagnósticos y terapéuticos, en los cuales se utilizan equipos que reproducen imágenes del organismo. Como se sabe, las primeras imágenes fueron obtenidas a finales del siglo XIX gracias al descubrimiento de los rayos X. Esto dio un aporte insospechado al avance y el desarrollo de las ciencias de la salud originando lo que actualmente se conoce como la especialidad de la imagenología. Esta disciplina de la medicina emplea diferentes modalidades de imágenes del cuerpo humano, obtenidas mediante un conjunto de equipos y métodos como ultrasonido, tomografía axial computarizada, resonancia magnética nuclear, radiología convencional y digital, para llegar en forma rápida y segura a la detección de muchas enfermedades, volviéndose herramientas imprescindibles para la atención adecuada y calificada de los pacientes.

Sin duda, la mayor ventaja que tiene la imagenología es la posibilidad de avanzar en el

LUIS MANUEL MONTAÑA ZETINA Doctor en Ciencias por el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados. Desde 1998 es profesor investigador del Departamento de Física del **Cinvestav** y miembro del Sistema Nacional de Investigadores, nivel I. Líneas de investigación: física de partículas elementales y estudios de detectores semiconductores para aplicaciones en mamografía y angiografía digital

en el área de física médica. Participa con el grupo mexicano integrante del proyecto ALICE en el Centro Europeo de Investigaciones Nucleares (CERN). En física médica ha participado y organizado congresos en México. Perteneció a la mesa directiva de la División de Física Médica de la Sociedad Mexicana de Física.

lmontano@fis.cinvestav.mx

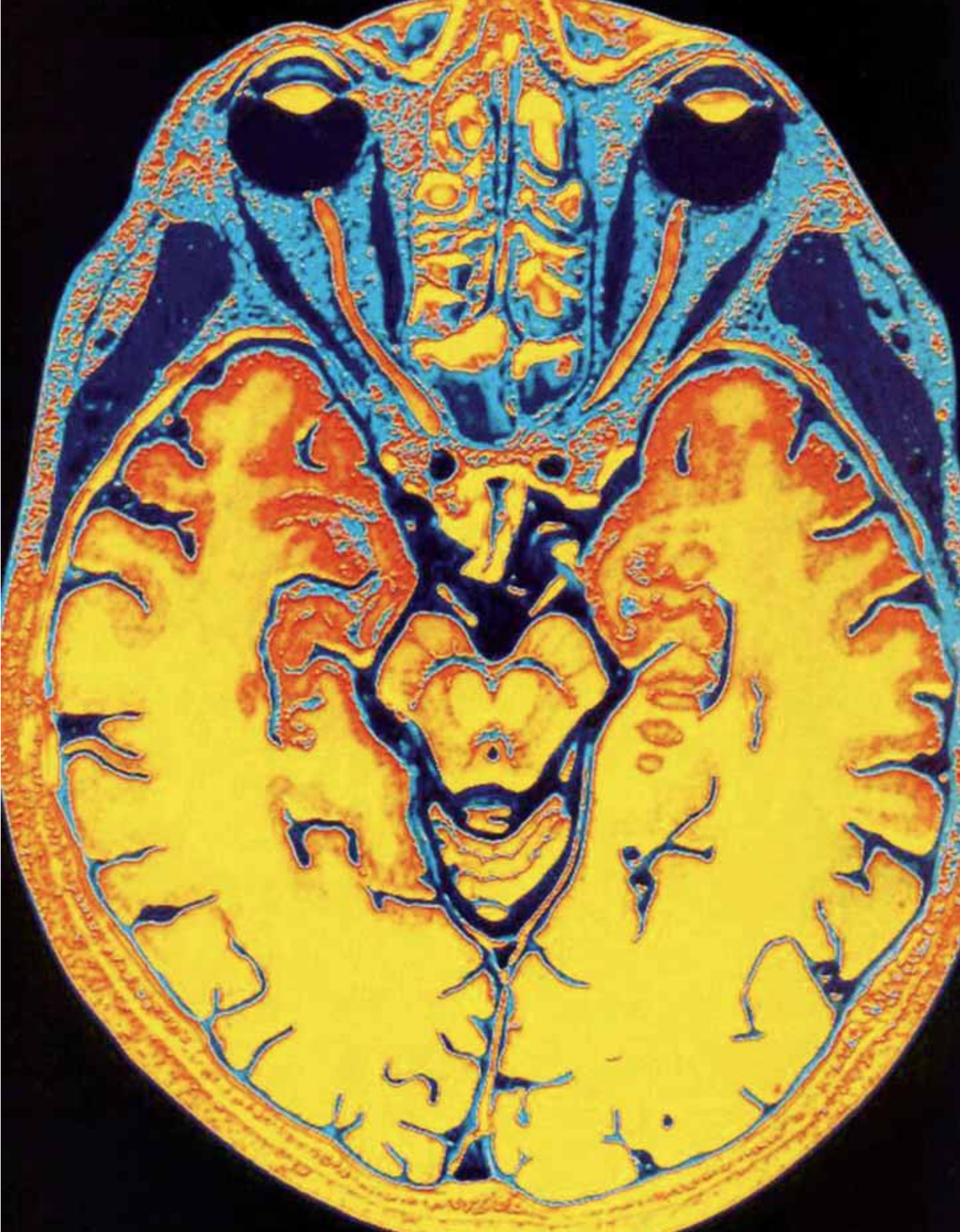


Imagen del cráneo por resonancia magnética.

La mayor ventaja que tiene la imagenología es la posibilidad de avanzar en el tratamiento de alguna enfermedad humana sin intervenir quirúrgicamente al paciente; esto se le conoce como métodos no invasivos.

El TAC es una exploración de rayos X que produce imágenes detalladas de cortes axiales del cuerpo. En lugar de obtener una imagen como la radiografía convencional, el TAC obtiene múltiples imágenes al rotar alrededor del cuerpo.

tratamiento de alguna enfermedad humana sin intervenir quirúrgicamente al paciente; esto se le conoce como métodos no invasivos. Prácticamente, la imagenología nació en el mismo momento que fueron descubiertos los rayos X, pero antes hay que aclarar qué es radiación y cómo se observa.

Detectores de radiación

La radiación se define como energía en movimiento. Es invisible para nuestros sentidos; es decir, no se puede tocar, oler ni ver, y es por eso que puede ser peligrosa e inclusive letal. En consecuencia, es necesario crear algún método o dispositivo que nos ayude a identificar el paso de la radiación y, para ello, auxiliarse de ciertos instrumentos que, por algún proceso físico, sean sensibles al paso de esta energía en movimiento. Estos instrumentos son los detectores de radiación.

El principio de funcionamiento de un detector de radiación se basa en los diferentes mecanismos físicos de interacción de la radiación con la materia, los cuales consisten principalmente en el desprendimiento de electrones de los átomos que conforman el material del detector. Estos electrones pueden ser recolectados por algún dispositivo, comúnmente llamado ánodo, y constituirán la señal que el detector nos muestra como prueba del paso de la radiación original.

Después de descubrirse la radiación, la siguiente tarea fue saber de qué se constituía. Se distinguieron tres tipos de radiación, que fueron llamadas alfa, beta y gamma. La radiación o partículas alfa son núcleos de helio (dos protones y dos neutrones). Estas partículas transfieren casi toda su energía al chocar con algún material y por ello son frenadas fácilmente. La radiación o partículas beta (electrones negativos o positivos) transfieren menos energía al material que las partículas alfa y, por lo tanto, pueden atravesar mayor volumen; sin embargo, bastan pocos metros de aire para frenar

este tipo de radiación. Finalmente, los rayos gamma son fotones, es decir, partículas de luz que no tienen masa; pueden atravesar mucho más material y su frenado es difícil, por lo que se requieren materiales de alta densidad como el plomo o el concreto.

Al estudiarse los tipos de radiación mencionados se fueron creando instrumentos para su identificación. Antes de los años 50 ya se utilizaban los contadores Geiger, instrumentos que someten al aire que contienen a grandes voltajes (se habla de cientos de voltios) para llevar los iones que se forman en la interacción con la radiación a los diferentes electrodos y así registrar la señal. Otro detector fue la cámara de niebla de Wilson, en la cual se veía a simple vista la trayectoria de la radiación al condensar a su paso el fluido contenido en ella. Posteriormente surgieron otros dispositivos que funcionaban de manera similar; por ejemplo, en los años 60 se desarrolló la cámara de chispas y la cámara de alambres. En la actualidad existe una variedad de detectores como son: contadores proporcionales, centelladores, tubos fotomultiplicadores, detectores de luz Cerenkov y detectores semiconductores.

Rayos X y dosimetría

El 28 de diciembre de 1895, Wilhelm Conrad Roentgen envió a la Sociedad Físico-Matemática de Würzburg, en Alemania, un escrito de diez páginas para su publicación. Imprimió algunas copias y las envió a científicos importantes de aquella época. El escrito iba acompañado de una radiografía de la mano de su mujer.

El descubrimiento de Roentgen tuvo tal impacto que ya a mediados de enero de 1896 los médicos y físicos utilizaban el aparato para tomar radiografías. Ese mismo año se aplicaron los rayos X para diagnosticar y establecer tratamientos a partir de anomalías internas que mostraban las imágenes radiográficas. Podemos decir que en ese tiempo nacieron también las áreas

conocidas como radiodiagnóstico y radioterapia.

Sin embargo, el uso de la radiación traía sus inconvenientes. Pronto se descubrió que el uso de los rayos X provocaba lesiones al cuerpo humano. Por tanto, fue necesario comprenderlos y estudiarlos cualitativa y cuantitativamente, es decir, conocer y cuantificar el depósito de energía de esos rayos en el cuerpo e indicar los daños que provocaban. En resumen, se quiso saber la dosis absorbida de radiación por algún material o por el cuerpo humano y así nació una nueva disciplina, la dosimetría.

El primer método para medir el depósito de energía de los rayos X fue verificar la cantidad de aire ionizado a su paso. Esto fue realizado pocos meses después del descubrimiento de Roentgen, aproximadamente en abril de 1896. Después, Becquerel midió la radiación emitida por el uranio. En el otoño de ese mismo año Perrin descubrió que la cantidad de iones creados en el aire estaba en relación lineal con la intensidad de la radiación incidente y que se podía medir esa carga acumulando los iones en algún electrodo. De esta manera se consideró a la cámara de ionización como un instrumento para medir la dosis que depositan los rayos X. En 1937, el “Roentgen” fue definido como la energía de un haz medido en una cámara de ionización.

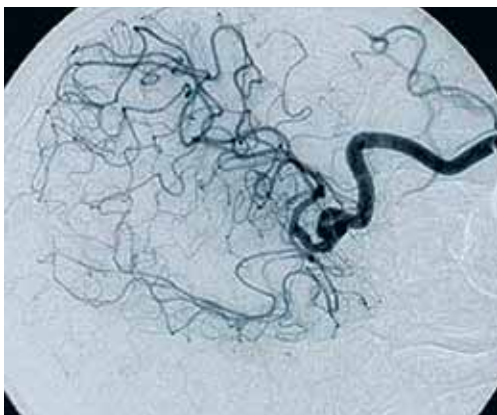
Inicialmente, la dosimetría se medía a través del grado de oscurecimiento de películas sensibles a radiación o también a los cambios en las propiedades químicas que tenían ciertas pastillas implantadas en la piel; sin embargo, esto no medía la dosis absorbida



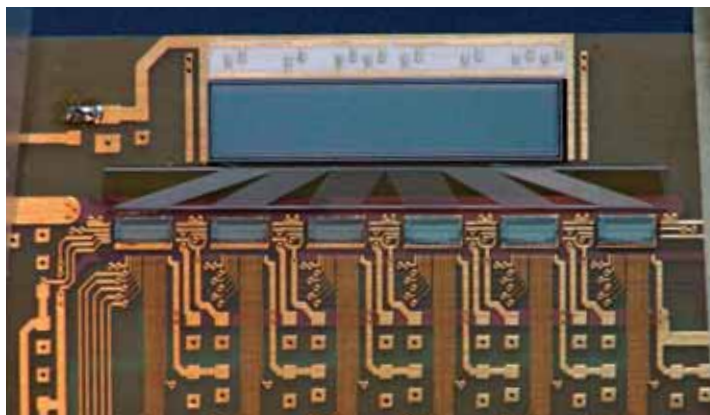
Una radiografía revolucionaria: la mano de la esposa de Wilhelm Roentgen, quien descubrió los rayos X.



Retrato de Wilhelm Roentgen.



Angiograma de la arteria carótida y arterias del cerebro.



Detector de silicio de microbandas utilizado en el Departamento de Física del Cinvestav.

en un paciente. El “rad” fue la primera unidad de medida para la dosis absorbida. Un rad representa la absorción de 100 erg de energía por cada gramo de tejido, por tanto, la dosis mide la energía depositada por unidad de masa. En el Sistema Internacional (SI) se usa la unidad Gray (Gy), que equivale a 100 rad, en honor a Louis Harold Gray (1905-1965), físico británico que trabajó principalmente en los efectos que produce la radiación en sistemas biológicos contribuyendo así al desarrollo del área de la radiobiología.

Los tipos de radiaciones ya mencionados provocan diversos efectos biológicos en los tejidos aunque dejen la misma dosis en ellos. La cantidad total de radiación que puede tolerar el cuerpo humano varía enormemente del tipo de tejido. Los órganos más sensibles son el cristalino del ojo, la espina dorsal, los pulmones y los intestinos. Para cuestiones de protección radiológica se emplea la unidad “Sievert”, la cual se calcula con la dosis absorbida en Gy multiplicada por un factor de calidad Q, que vale 1 para la mayoría de las energías de los rayos X, 10 para neutrones y 20 para partículas alfa. Esta unidad mide la dosis equivalente y fue elegida en honor a Sievert, quien en 1925 trabajó intensamente en los controles de los niveles de dosis que se manejaban en las clínicas de su país natal, Suecia. Asimismo, sentó las bases para calcular la dosis absorbida en tumores, desarrolló aparatos para irradiar a los pacientes en programas de tratamiento, así como aparatos para medir dosis.

Detallando más los diferentes tipos de radiación, es importante distinguir entre radiación ionizante y no ionizante. Como se mencionó antes, la dosis mide la energía que absorbe un material cuando pasa a través de algún tipo de radiación. Sin embargo, para que el material absorba esa energía, la radiación debe ionizar el material, es decir, quitar electrones de los átomos del material. A los átomos eléctricamente no neutros se les llama iones. La radiación no ionizante se refiere a aquella parte del

espectro electromagnético donde la energía de los fotones no es capaz de romper enlaces químicos; incluye los rayos ultravioleta, luz visible, luz infrarroja, radiofrecuencia y microondas. Por su parte, la radiación ionizante incluye rayos energéticos más allá del ultravioleta.

Es inevitable estar expuestos a radiación ionizante. Día con día, y a lo largo de la historia del planeta, todos estamos expuestos a los rayos cósmicos que caen a la Tierra y a la radiactividad presente en las rocas y la tierra. Se sabe que la exposición a radiación ionizante es causa del origen del cáncer. Por ejemplo, en los sobrevivientes de las bombas atómicas de Hiroshima y Nagasaki, que estuvieron expuestos a rayos gamma, se observó un incremento de padecimientos como leucemia, cáncer de mama y tiroides, entre otros. Sin embargo, la radiación ionizante se utiliza en la medicina para fines de diagnóstico (radiografía) y tratamiento (radioterapia).

En la aplicación de la radiación en medicina podemos aclarar algunos términos, tales como medicina nuclear, física de la salud y la diferencia entre ambas. La medicina nuclear es una de las aplicaciones de la medicina de radiación que es usada para diagnosticar y tratar alguna enfermedad. A los pacientes se les suministra radiactividad a través de materiales llamados radionúclidos. Este material viaja por el torrente sanguíneo hasta implantarse en aquellos órganos que están bajo estudio y, al detectar fuera del cuerpo la radiación emitida por los radionúclidos, esto permite conformar una imagen. Así se pueden verificar varios aspectos: si la función de estos órganos es normal o no, si hay presencia de algún tumor, entre otros.

Por su parte, la física de la salud es conocida también como seguridad radiológica. Los que llevan a cabo esta actividad se dedican a entender, evaluar y controlar los riesgos y los beneficios del uso de la radiación. La recomendación actual de la Comisión Internacional de Protección Radiológica (CIPR) es limitar

La cantidad total de radiación que puede tolerar el cuerpo humano varía enormemente del tipo de tejido. Los órganos más sensibles son el cristalino del ojo, la espina dorsal, los pulmones y los intestinos.

la dosis anual en el público general a 1mSv; para quienes trabajan con radiación, la dosis se limita a 100mSv en 5 años.

Generando imágenes

Desde la primera radiografía lograda por Roentgen, se han hecho esfuerzos para obtener imágenes que muestren partes del interior del cuerpo humano con una mejor calidad y resolución. Para lograr una buena imagen en los términos antes mencionados, se deben tomar en cuenta cuatro tipos de resolución: espacial, contraste, temporal y estadística. La resolución espacial está relacionada con la geometría del proceso de formación de la imagen y, dependiendo de la técnica, de la pantalla intensificadora. El contraste depende del tejido y la forma en que atenúa los rayos X; asimismo, de la energía de estos rayos y de su dispersión por el tejido. La resolución temporal depende de cuán borrosa es la imagen causada por el movimiento voluntario e involuntario del paciente. Finalmente, la resolución estadística se relaciona con el número de rayos absorbidos por la pantalla; entre más rayos se absorban, menos ruido estadístico habrá.

Las técnicas para obtener imágenes del cuerpo humano, como el TAC, PET, SPECT, ultrasonido y resonancia magnética nuclear (RMN), son cada vez más conocidos por el público en general. A continuación describiremos estas técnicas.

El TAC es una exploración de rayos X que produce imágenes detalladas de cortes axiales del cuerpo. En lugar de obtener una imagen como la radiografía convencional, el TAC obtiene múltiples imágenes al rotar alrededor del cuerpo. Una computadora combina todas estas imágenes en una imagen final, que representa un corte del cuerpo como si fuera una rodaja. Esta máquina crea múltiples imágenes en rodajas (cortes) de la parte del cuerpo que está siendo estudiada.

La tomografía por emisión de positrones, TEP (*Positron Emission Tomography*, PET por las siglas en inglés), es una técnica no invasiva de diagnóstico por imagen, capaz de medir la actividad metabólica de los diferentes tejidos del cuerpo humano, especialmente del sistema nervioso central. Al igual que el resto de técnicas diagnósticas en medicina nuclear, la TEP se basa en detectar y analizar la distribución que adopta en el interior del cuerpo un radioisótopo administrado a través de una inyección. Lo que hace es medir la producción de fotones gamma (resultado de la interacción de un positrón con algún electrón del tejido).

SPECT es una técnica para obtener imágenes bidimensionales de un cuerpo tridimensional a través de un dispositivo llamado cámara gamma. Las imágenes son, en realidad, proyecciones de ángulos múltiples del cuerpo en cuestión. Posteriormente se utiliza una computadora para aplicar un algoritmo de reconstrucción tomográfica de estas proyecciones múltiples obteniendo así la imagen tridimensional.

El ultrasonido (también conocido como ecografía) emplea los ecos de una emisión de ultrasonidos dirigida sobre un cuerpo u objeto como fuente de datos para formar una imagen de los órganos o masas internas. Un pequeño instrumento llamado transductor emite ondas de ultrasonidos. Estas ondas sonoras de alta frecuencia se transmiten hacia el área del cuerpo bajo estudio y se recibe su eco. El transductor recoge el eco de las ondas sonoras y una computadora lo convierte en imagen. En la ecografía no se emplea radiación.

La resonancia magnética nuclear se basa en las propiedades magnéticas que poseen los núcleos atómicos (generalmente el hidrógeno) para crear imágenes. Esta técnica alinea los campos magnéticos de los átomos en la dirección de un campo magnético externo. Al regresar dichos átomos a su estado original, emiten una señal (podría decirse que resuenan) que registra una computadora para producir la imagen.

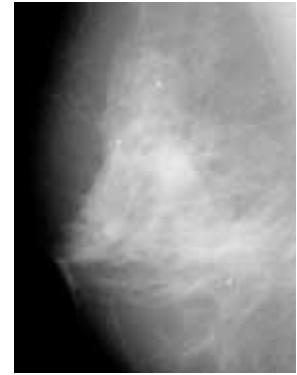
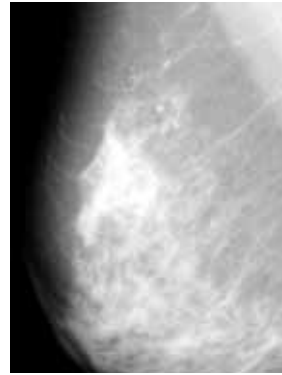
Cáncer

El cáncer es una enfermedad en la cual se altera la división normal de las células. Hay una sobreproducción incontrolada de células, que normalmente trae como consecuencia la formación de tumores. Una causa de que surja esta producción incontrolada de células es cuando se modifica la estructura atómica de los elementos que constituyen el interior de la célula. Por ejemplo, la ionización es un proceso que ocurre al azar, por lo que cualquier molécula puede resultar modificada al irradiarse la célula. Si la molécula ionizada es parte de la membrana celular, es posible que se produzca una rotura que cause la muerte de la célula. En general, esta célula será reemplazada por otra. Si la molécula dañada es el ADN del núcleo celular, parte de la información almacenada en los genes se pierde o se modifica provocando mutaciones. Este daño se manifestará cuando la célula comience a reproducirse. Por un lado, la célula podría no reproducirse y así no dejar descendencia, pero también es posible que la célula empiece a reproducirse descontroladamente dando origen a algún tipo de cáncer.

Para muchos cánceres curables la terapia inicial es lo más importante. Cualquier reducción de dosis, retraso o cambio en el medicamento puede ser crítico para el éxito en el tratamiento. Entre los diferentes métodos de tratamiento que existen para el cáncer está la quimioterapia. Hay más de 200 tipos diferentes de cáncer y cada uno responde de manera variable a este tipo de tratamiento, que empezó a aplicarse desde el año 1943.

Cáncer de mama

En esta sección se hablará del cáncer de mama debido a que en el **Cinvestav** se están haciendo esfuerzos para contribuir en la lucha contra este mal aprovechando la



Mamografías convencionales.

experiencia de varios investigadores de diferentes departamentos del centro. Se han establecido convenios con hospitales, se han presentado proyectos internos, nacionales e internacionales para llevar a cabo investigaciones y aplicaciones que contribuyan a disminuir la tasa de muerte por este tipo de cáncer, que llega a ser la segunda causa de muerte por cáncer en el mundo.

Para explicar el origen del cáncer de mama existe la llamada hipótesis de exceso de estrógenos. Los estrógenos incrementan la proliferación de células en las mamas. En experimentos con animales, al administrarles más estrógenos se incrementa el rango de desarrollo de tumores. Por otro lado, las mutaciones heredadas del gene BRCA1 contribuyen a una pequeña proporción de todos los cánceres de mama, pero los miembros de las familias afectadas tienen 70% de posibilidad de desarrollar cáncer de mama o en los ovarios.

Se han hecho muchos estudios para conocer y controlar el desarrollo del cáncer de mama. Así, se ha encontrado que a mayor masa corporal, mayor es el riesgo de padecer cáncer de mama en mujeres posmenopáusicas. Dicho riesgo se reduce un poco en mujeres antes de la menopausia; una posible explicación es que ovulan menos, como si estuvieran en las etapas de embarazo y lactancia. Después de la menopausia, la obesidad podría estar relacionada con mayor producción periférica (a diferencia de gonadal y adrenal) de estrógenos. Otra causa del desarrollo de este cáncer está relacionada con los metabolismos hormonales, factores reproductivos y el estado de menopausia, de ovarios y del endometrio. También está el factor del uso combinado de anticonceptivos, que podría incrementar ligeramente el riesgo de padecer cáncer pero, al parecer, disminuye el riesgo de cáncer de ovarios y del endometrio.

El ultrasonido (también conocido como ecografía) emplea los ecos de una emisión de ultrasonidos dirigida a un cuerpo u objeto como fuente de datos, para formar una imagen de los órganos o masas internas.

Desde hace tiempo, el Departamento de Física del Cinvestav ha aceptado estudiantes que tienen interés en hacer investigación en física médica (ver la siguiente sección), particularmente en el desarrollo de sistemas de detección digital para mamografía. Esta investigación pretende dar una contribución en México al mejoramiento de detección temprana de cáncer de mama desarrollando un sistema de mamografía digital. Contamos, entre otros, con la participación de físicos, oncólogos, radiólogos, estudiantes y técnicos para llevar a cabo esta tarea.

Física médica

Por todo lo aquí expuesto, el lector podrá apreciar cómo diferentes áreas de la física han ayudado al área clínica para el diagnóstico, tratamiento y cura de enfermedades; la física médica es la aplicación de conceptos y métodos de esta disciplina para el diagnóstico y el tratamiento de las enfermedades humanas. Desde hace tiempo, el término *física médica* forma parte del lenguaje en la comunidad académica, científica e inclusive en el público en general. Los estudiantes se sienten atraídos por el área por dos razones principales: les gusta cómo la física se aplica en la vida real y cómo beneficia directamente y en gran medida a las personas.

El papel de los físicos médicos en el campo de la salud pública es muy importante. Tienen la capacidad de trabajar en tres sectores: académico, industrial y salud (hospitales). En lo que se refiere al sector académico, un instituto que tenga un departamento de física médica típicamente incluye físicos, ingenieros, expertos en computación, científicos y matemáticos, quienes podrían llamarse físicos médicos o bioingenieros. Podríamos decir que ese departamento une esfuerzos de científicos de diferentes áreas para mejorar las técnicas existentes,

así como para encontrar y crear otras técnicas que ayuden a prevenir enfermedades y salvar vidas. Sin esos institutos e investigadores, el desarrollo y la aplicación de técnicas como la tomografía computarizada, la resonancia magnética nuclear para el diagnóstico o el uso de haces de partículas para el tratamiento de tumores no habrían sido posibles.

Por otro lado, las razones para que haya un físico médico en un hospital pueden resumirse en lo siguiente: tiene una formación adecuada desde el punto de vista científico y técnico del área; hace uso eficiente de los recursos ayudando a bajar costos; incorpora técnicas y equipos cada vez más complejos en hospitales y clínicas. Algunas de sus funciones son las siguientes:

- Aplicar conocimientos de dosimetría.
- Planificar el tratamiento del paciente y formas complementarias.
- Controlar periódicamente los equipos de terapia y localización.
- Controlar el mantenimiento de unidades de diagnóstico y/o tratamiento.
- Organizar la protección radiológica en la clínica.
- Organizar los métodos de diagnóstico y programas de control de calidad.
- Utilizar las técnicas de medición de radiaciones ionizantes.
- Utilizar los sistemas de computación.
- Asesorar en la adquisición de equipos.
- Dar pruebas de aceptación de equipos adquiridos.
- Formar personal.

En resumen, la intención de este documento fue proporcionar al lector una visión de la contribución de las técnicas y los dispositivos de obtención de imágenes, así como dar cuenta de la intervención cada día más evidente e indispensable de la física para auxiliar a la medicina en pro de la salud humana. ●

[Bibliografía]

- Gibson, A.P., Cook, E. y Newing, A. Teaching Medical Physics. *Physics Education*. 41(4): 301-306. 2006.
- Hendee, W. X rays in medicine. *Physics Today*. Noviembre, pp. 51-56. 1995.
- Knoll G. *Radiation detection and measurements*. Ed. John Wiley and Sons.
- <http://www.fis.cinvestav.mx/~gae/fismed2.html>.
- World Health Organization (WHO from OMS). International Agency for Research on Cancer. *World Cancer Report*. Ed. Bernard W. Stewart y Paul Kleihues. IARC Press. Lyon. 2003.