

## La génesis del uso de las radiaciones en la medicina

Roberto Cuenca, Ing.\*

«En la ciencia, en el campo de la observación, la casualidad sólo favorece a la mente preparada»

Louis Pasteur

### RESUMEN

En un breve recorrido histórico se rememoran los 100 años del nacimiento al mundo científico, de lo que hoy se conoce como «imagenología» y los usos de las radiaciones en provecho de la humanidad. Se recuerdan los orígenes y procesos de descubrimiento de las radiaciones ionizantes y sus precursores importantes, así como el empleo creciente y diversificado de las formas energéticas, atómicas y nucleares. Se insinúan algunas ideas acerca de los principios masivos de la protección radiológica.

Palabras claves: Radiología. Rayos X. Imagenología. Radiación ionizante. Historia.

A finales del siglo XIX las expectativas en el progreso médico se centraron en dos áreas de reciente aparición: la *microbiología* y la *bioquímica* y nada hacía prever nuevos avances en el campo de la física aplicada.

Constituía una gran incógnita lo que pasaba en el interior del cuerpo de pacientes vivos con alguna lesión o enfermedad, así como la localización y tamaño de una fractura ósea o la presencia de un cálculo renal.

Pero pocos meses antes de terminar 1895 nacería el reino de la *imagen*. Casi simultáneamente con la introducción de la cinematografía en Francia por los hermanos Lumiere, se logra el descubrimiento de una radiación extraña que se llamó *rayos X*.

Este descubrimiento marcará el principio de la segunda revolución científica, el nacimiento de la *física moderna*. Será el hallazgo de la física que mayor impacto directo tendrá en la medicina. Con él nacerán la radiología, la medicina nuclear y el comienzo de una tradición científica: los estudios de los físicos sobre la estructura de la materia, que ofrecen, consecuentemente, importantes y novedosas herramientas para el diagnóstico y tratamiento de algunas enfermedades.

¡Por supuesto, el radiólogo no es el que arregla aparatos de radio! Desde que Röntgen descubrió hace más de 100 años los rayos X, la radiología es el término utilizado para designar las aplicaciones médicas de las radiaciones y radiólogo el que designa al médico que se especializa en ciencias radiológicas.

Hoy la imagenología tiene un brillante provenir, gracias a las posibilidades que ofrece la informática para obtener, conservar y transmitir imágenes y para planificar la radioterapia. La telemática abre una vía al teleprocesamiento de imágenes y a la telemedicina.

El empleo de las radiaciones, en las artes curativas, ha proporcionado grandes avances en la salud de la comunidad.

El diagnóstico y tratamiento de la enfermedad e investigación de la causa, historia y curación de aquella mediante el empleo de la radiación, ha aumentado enormemente nuestra esperanza de vida, salud y bienestar. Sin embargo, en todas las ocasiones en que se haga uso de la radiación se deben pesar los beneficios esperados y los daños que se pueden ocasionar.

Las aplicaciones de diagnóstico de las radiaciones son innumerables, pues

cada vez se encuentran más técnicas adecuadas que visualizan no sólo los huesos, dientes y cavidades corporales sino que hacen cortes de tejidos e imágenes que permiten precisar desarrollos aún incipientes de cualquier enfermedad, por ejemplo, evaluar el estado de las paredes arteriales y reconocer en una fase precoz los ateromas en vías de formación.

La exposición clínica (aun la dental) a los rayos X, constituye a la fecha la mayor fuente artificial de exposición externa a las radiaciones. Como ejemplo, se sabe que niveles de dosis en ciertos procedimientos de diagnóstico con rayos X son generalmente del mismo orden de magnitud que los niveles de exposición de emergencias aceptadas en el campo de la energía nuclear. Así, el problema principal de los efectos de la radiación en trabajos de diagnóstico radiológico se encuentra en el campo de los efectos a largo plazo (carcinogénesis, acortamiento de la esperanza de vida y cambios genéticos).

Actualmente suscitan grandes esperanzas la biología molecular, la biotecnología, la informática y la física y el mundo aguarda con impaciencia los frutos de la investigación multidisciplinaria realizada por radiobiólogos, físicos, especialistas en dosimetría, ingenieros y expertos

\* Profesor Asociado, Escuela de Salud Pública, Facultad de Salud, Universidad del Valle, Cali, Colombia.

en informática.

Pero a pesar de las considerables y crecientes inversiones en todo el mundo para mejorar las técnicas de diagnóstico por imagen, dos terceras partes de la población de los países en desarrollo no tienen acceso ni siquiera a la radiología básica.

En esta era espacial de la tecnología de vanguardia, los pacientes confían más en las nuevas metodologías asistenciales, que parecen ofrecerles mayor garantía.

Como dato curioso, dos meses después del descubrimiento de Röntgen, un eminente físico húngaro, Endre Högyes, publicó un trabajo en una revista médica de su país en el que sugería que la nueva técnica podría ser aplicable en el campo de la medicina. Su trabajo, titulado "Fotografía del esqueleto a través del cuerpo por el método de Röntgen" se ilustró con una serie de notables radiografías, entre ellas una de un esqueleto de rana.



Figura 1. Esqueleto de rana por Högyes.

Los descubrimientos en el campo de las radiaciones han dado lugar a varios premios Nobel como el concedido a Wilhelm Konrad Röntgen, en física en 1901; en 1903 se otorgó conjuntamente a Henri Becquerel, Marie Curie y Pierre Curie, en física; en 1911 Marie Curie recibió el Nobel en química.

## EL CONTEXTO DE LAS RADIACIONES

El empleo con fines de servicio de las radiaciones ionizantes y no ionizantes, tanto en la industria como en la medicina, ha servido de pilar al desarrollo de la humanidad y su bienestar. Además, la especie humana está siempre expuesta a las radiaciones ionizantes de origen cósmico, a radiaciones naturales del medio donde vive y a radiaciones internas en su cuerpo.

Esto se inicia, en el campo del conocimiento, a partir de 1895 con el descubrimiento de los rayos X por Röntgen. Al año siguiente Henri Becquerel descubre en París la radiactividad y en 1897, Joseph John Thomson descubre el electrón. En el curso de un decenio, Rutherford, Planck y Einstein sientan las bases de la física moderna y sus aplicaciones.

Si Copérnico, Galileo y Newton iniciaron la primera revolución científica, Röntgen con su descubrimiento marca el comienzo de la segunda revolución, el nacimiento de la física moderna, que lleva a reconocer la existencia de un universo microscópico en el interior de la materia, algo insospechado hasta entonces. En rápida sucesión, uno tras otro, los hallazgos y logros científicos, que siguen al descubrimiento de los rayos X, cambian el mundo científico: la radiactividad natural, el electrón, la teoría cuántica de Planck, el núcleo atómico, la radiactividad inducida, la relatividad, la mecánica cuántica, la comprensión del átomo, la electrónica, etc.

Del descubrimiento de Becquerel de la radiactividad natural, se derivan, entonces en 1898, el aislamiento del radio ( $\text{Ra}_{226}$ ) por Pierre y Marie Curie y sus aplicaciones médicas, los progresos en el conocimiento de la estructura del átomo, la radioquímica,

los isótopos radiactivos artificiales y por último la energía atómica.

El descubrimiento del electrón por JJ Thomson en 1897 dará lugar a la electrónica moderna y sus aplicaciones médicas.

En 1934 Irene y Frédéric Joliot Curie descubren la radiactividad artificial y se da impulso a sus aplicaciones médicas. Se aprende así a fabricar isótopos radiactivos de la mayor parte de los elementos naturales y, gracias a la radiación que emiten, se puede seguir en el interior del organismo humano su destino o el de las moléculas en los que se han introducido. Previamente Georg Von Heves inició el empleo de los marcadores, en 1913, con radioisótopos naturales. En 1922, Antoine Lacassagne descubre el principio de la autorradiografía. Con estos precursores se sientan las bases de la medicina nuclear que experimenta un rápido desarrollo entre 1935 y 1939 y sobre todo a partir de 1945 en adelante. Desde 1970, la escintigrafía y las cámaras de centelleo permiten una mejor exploración de numerosos tejidos y órganos. Luego surgen la cámara de positrones, la tomoescintigrafía y el diagnóstico funcional por imagen, que hacen de la medicina nuclear una de las ramas más actualizadas de la imagenología.



Figura 2. Röntgen y su primera radiografía.

En los años siguientes al descubrimiento de Röntgen, la expresión *diagnóstico por imagen* no significaba más que radiografía, es decir, el empleo de los rayos X para obtener una placa radiográfica; pero en los últimos 50 años el nivel técnico alcanzado por la imagenología es grandioso, pero aún puede progresar más gracias a las posibilidades que ofrece la informática, la telemática (al abrir nuevas vías de teleprocesamiento de imágenes); la ultrasonografía intraoperaria (permite descubrir alteraciones patológicas y guiar al cirujano en el curso de una intervención); estudios de isotópos, tomografía computarizada (TC) (acelera la exploración de órganos y proporciona imágenes detalladas); la tomografía potencial aplicada, el doppler-láser, la resonancia magnética, el biomagnetismo (técnica de diagnóstico clínico por imágenes, que en operaciones del cerebro evita los riesgos de lesiones de centros motores), la TC láser de infrarrojos, la tomografía por emisión de positrones, entre los cuales la ultrasonografía es la que más se utiliza en la actualidad en Colombia. La integración de las diversas modalidades de diagnóstico por imagen mediante programas informáticos se convertirá en una realidad clínica cotidiana, con el consiguiente mejoramiento de la visualización, la sensibilidad y la especificidad. Las radiografías se digitalizan (se prescinde de la película) y como su recuperación se hace instantáneamente en forma aleatoria, se pueden transferir sus imágenes a cualquier sitio. Por medio de la telerradiografía se podrá obtener asesoramiento de especialistas eminentes para interpretar una imagen difícil. Todas las modalidades mencionadas se tendrán que integrar y adaptar en el futuro a la genética médica. Aparecerán nuevas técnicas

de demostración de imágenes para identificar los portadores de genes de enfermedades y supresores genéticos gracias a los estudios del genoma humano.

Casi todos los equipos de rayos X tienen muchos parámetros que se pueden alterar cuando se aplican a los pacientes y dan por resultado sobreexposiciones innecesarias a los mismos y hasta a los propios operarios, pero aún así son muy usuales y seguros si se utiliza bien el equipo y se justifica clínicamente el empleo. En exámenes dinámicos, el radiólogo dispone de un aparato de rayos X llamado fluoroscopio que le permite observar en tiempo real la contracción cardíaca, el tránsito de la sangre por una arteria de la cabeza o el flujo de orina por los riñones.

La radioterapia constituye la tercera rama de la radiología. Nace en 1896, pero sólo toma su verdadera dimensión a partir de 1903 con el descubrimiento del radio, y se convierte en una de las armas principales de la lucha contra el cáncer. En la actualidad se estima que en un programa coherente de lucha anticancerosa, la radioterapia sola o asociada con la cirugía o la quimioterapia resulta indispensable en más de la mitad de los casos de esa enfermedad.

La radiobiología y la radioprotección nacieron en los primeros años del siglo XX como una respuesta a las observaciones de los médicos al comprobar que la exposición repetida a estas fuentes de radiaciones podría provocar inflamaciones e incluso cánceres en el propio operador. Así, entre 1920 y 1939, la frecuencia de leucemia era 10 veces más elevada en los radiólogos que entre los demás médicos. En 1934 se comienza a vislumbrar la relación entre dosis y el riesgo de cáncer y se formulan, por tanto, algunas sencillas reglas de

radioprotección y se fija una dosis máxima admisible.

Las radiaciones se utilizan también en usos industriales como la radiografía de piezas metálicas en metalmecánica, determinación de perfiles, peso básico, densidad y niveles de material en la industria papelera, generación de energía en los reactores atómicos y otras aplicaciones menores como eliminación de estática, instrumentos de altitud de los aviones, detectores de humo y pararrayos.

### EL DESCUBRIMIENTO DE LOS RAYOS X

Universidad de Würzburg, Baviera, Alemania, noviembre de 1895. El físico Wilhem Konrad Röntgen termina su período como rector y se dispone a realizar una investigación científica acerca de la "*naturaleza de los rayos catódicos*." Desde tiempo atrás se tenía la inquietud que estos rayos eran la clave para comprender la electricidad. Röntgen sabe de las experiencias de su colega Philipp Lenard con la extracción de rayos catódicos del tubo donde se generan a través de una muy delgada ventana de aluminio, pero ¿cómo se comportan estos rayos fuera del tubo, en el aire? ¿Qué tan lejos llegan? ¿Qué efectos tienen?

Viernes 8 de noviembre de 1895. Laboratorio de Roentgen. Sobre su mesa de trabajo está el carrito de inducción, carrito de Rühmkorff, conectado a las baterías y listo para operar. De los bornes del carrito de inducción salen los alambres a los electrodos del tubo de rayos catódicos, donde tiene ya un buen vacío de  $10^{-3}$  a  $10^{-4}$  mm Hg, que ha alcanzado con la bomba de mercurio de Sprengel. Alrededor del tubo de rayos catódicos coloca una cartulina negra, que envuelve completamente al tubo sin dejar ranura. Acaba de cerrar el inte-

rruptor y activa así el carrete de inducción, cuando su vista capta un resplandor que viene de una placa fluorescente, que por casualidad está sobre su mesa de trabajo. El resplandor es visible pues el laboratorio está oscuro. Cierra las ventanas del laboratorio y ya en plena oscuridad la fluorescencia es más notoria. La fluorescencia es la respuesta del platino-cianuro de bario de la placa a la luz que incide sobre ella: recibe luz y emite entonces un resplandor característico. Observa que el resplandor continúa sin que la luz incida sobre la placa, en plena oscuridad. Esto es algo raro ¿qué es lo que excita al material de la placa fluorescente? ¿Es el resplandor producto de la activación del carrete de inducción sobre el tubo de rayos catódicos? Al conectar y desconectar varias veces este carrete confirma que en efecto la fluorescencia observada en la placa es una respuesta a la actividad del tubo de rayos catódicos. Pero el tubo está completamente cubierto por la cartulina negra y entonces ¿no hay posibilidad de envío de luz a la placa? Así Röntgen concluye que tiene que haber un agente desconocido, que al partir del tubo de rayos catódicos, atraviesa la cartulina y llega hasta la placa y activa en ella su fluorescencia. Al ubicar la placa a varios metros de distancia del tubo, todavía se presenta el resplandor. Entonces su alcance es apreciable. Ensayo con varios tipos de cubiertas: papel, libros, madera, para ubicar materiales como obstáculo entre el tubo y la placa pero el resplandor persiste, aunque su intensidad disminuye al aumentar la densidad o el espesor del material.

Se sucede el momento más glorioso de su vida, cuando pone su propia mano entre el tubo y la placa y ¡cuál no sería su sorpresa cuando en la placa fluorescente observa no la som-

bra normal de su mano, sino claramente los huesos! Röntgen es así, la primera persona que puede ver el interior del cuerpo sin tener que abrirlo quirúrgicamente.

Al continuar su trabajo experimental ha descubierto que los efectos de estos rayos especiales se pueden también registrar y con mayor claridad, en placas fotográficas. Invita a su esposa Bertha y le pide que ponga la mano, con anillos y pulseras, entre el tubo de rayos catódicos y la placa fotográfica. El resultado es la fotografía, hoy llamada radiografía, que le dará más tarde la vuelta al mundo.

Tras siete semanas de trabajo aislado en su laboratorio, Röntgen comunica al mundo su descubrimiento, y envía a la Sociedad de Física Médica de Würzburg el 28 de diciembre de 1895 un artículo titulado “Sobre un nuevo tipo de rayos, una comunicación preliminar.”

Cuando le preguntaron qué pensaba de su magno descubrimiento, Roentgen respondió: “No pienso; investigo,” pues consideraba que la ciencia no pertenecía sólo a los científicos. Al juzgar que sus descubrimientos pertenecían a la humanidad y no debían verse limitados por patentes, licencias o contratos de monopolios, renunció a la posibilidad de hacerse rico; no exigió derechos de autor por sus primeras imágenes radiográficas ni aceptó un título de nobleza que le ofrecieron y donó a la Universidad de Würzburg la dotación económica del Premio Nobel que le concedieron en 1901. Su generosidad contribuyó sin duda a la rápida difusión del nuevo descubrimiento y preparó el terreno para el extraordinario desarrollo ulterior del diagnóstico por imagen.

Al hablar de ese agente activo que produjo la fluorescencia y que pasaba a través de la cartulina negra que envolvía al tubo de rayos catódicos,

lo llamó rayos X: «X» por ser desconocidos, “rayos” por la formación regular de sombras de los objetos ubicados entre el tubo y la pantalla fluorescente y también por las fotografías de este agente con la cámara de agujero; es decir, ese agente se propagaba en línea recta en todas las direcciones.

Las características enunciadas fueron:

1. Los cuerpos se hacen *transparentes* a los rayos X: la transparencia la obtienen de la apreciación de las impresiones fotográficas con rayos X para tiempos iguales de exposición, aunque se anotó que estaban pendientes las mediciones fotométricas, por no contar con un fotómetro adecuado. La transparencia de las diversas sustancias a los rayos X disminuye entre más densa sea la sustancia y al aumentar su espesor.
2. Producen *efectos especiales*: la fluorescencia en diferentes sustancias, los efectos en distintas placas fotográficas, los efectos de calentamiento para largas exposiciones a los rayos X.
3. Sobre la *naturaleza* de los rayos X: aunque son generados por los rayos catódicos, son diferentes a éstos, porque inciden sobre la pared del tubo de descarga o sobre otros obstáculos, p.e., la placa metálica del anticátodo del tubo. Y, a diferencia de los rayos catódicos, no son desviados por intensos campos magnéticos. En contraste con la luz, estos rayos son completamente invisibles, no son sensibles al ojo humano, ni por acercar los ojos al tubo de descarga. Tampoco se refractan al pasar por prismas de diversos materiales, y concluyó que no es posible producir lentes para concentrarlos, ni presentan fenómenos de

interferencia al pasar por rendijas.

La publicación de Röntgen describía claramente la forma de obtener los rayos X, y los equipos, que en esa época estaban en cualquier laboratorio de física y eran de fácil adquisición. Michael Pupin, de la Universidad de Columbia, EE. UU., informó tener éxito en generar rayos X, pues se produjeron radiografías que mostraban el esqueleto humano: *¡el esqueleto de los vivos, no de los muertos!*, lo que era muy impactante, pues hasta ese momento el esqueleto se asociaba con la muerte.

Se genera una especulación consumista: todos deseaban tener la fotografía de sus huesos, bañarse en rayos X, recibir los rayos para mantenerse jóvenes, limpiar la piel, pues se les atribuían poderes mágicos, tal vez como fuente de salud y juventud. Los carretes de inducción y los tubos de rayos catódicos ahora son llamados tubos de rayos X. Para los médicos, en sus consultorios, se hace casi obligatorio ofrecer la posibilidad del uso de rayos X para el diagnóstico y tratamiento de diversas enfermedades: se utilizan los rayos X para depilar el cuero cabelludo en los niños que sufrían tiña. Se informan éxitos en Francia logrados con los rayos X en el tratamiento de cánceres de estómago y boca.

En Menlo Park, Estados Unidos, Thomas Alva Edison trabajaba con nuevas sustancias para mejorar las placas fluorescentes a fin de producir una respuesta más rápida, que permitiera obtener imágenes de rayos X en movimiento (hay que recordar que en esa época ya se tenía el cinematógrafo). Edison experimentó así con lo que llamó "fluoroscopio," que permitía observar el interior del cuerpo humano en movimiento. Para lograr esto hubo que ensayar largas horas de exposición a los rayos X de mucha

intensidad, y un colaborador de Edison sufrió serias quemaduras producidas por los rayos X. Al ser tan grave este accidente, Edison decidió suspender los experimentos. Luego pudo mejorar los equipos de rayos X, y aumentar su potencia, su precisión y su seguridad.

En la presentación del descubrimiento de Röntgen se encuentra Antoine Henri Becquerel, quien está muy interesado en comprender la naturaleza de la fluorescencia. Se pregunta ¿acaso la fluorescencia produce rayos X? Inicia una serie de experiencias con sustancias fluorescentes puestas sobre placas fotográficas muy bien cubiertas con su envoltura protectora. Pero el sol de invierno de esa época (enero 1896) es débil y no logra excitar suficientemente la fluorescencia para que ésta genere rayos X que atraviesen la cubierta protectora del material fotográfico. Guarda las placas en un cajón cerrado, en espera de mejores condiciones de sol. En marzo revela las placas y buscaba obtener una huella débil de la poca fluorescencia que logró generar. Pero su sorpresa es mayúscula al ver la huella más intensa que lo que calculaba; así Becquerel descubrió la «radiactividad natural»: en aquel cajón había unas sales de uranio que emitían una radiación mayor, independientemente de cualquier fenómeno de fluorescencia. Este nuevo tipo de radiación era aún más penetrante que los rayos X.

Nuevamente la especulación consumista surge, pues al descubrir la existencia de zonas con intensa radiactividad natural, muchos propietarios de balnearios termales anunciaron los efectos benéficos para la salud que resultaban de beber sus aguas radiactivas, se incitaba al público a introducirse en el agua y a respirar el aire de minas antiguas, como tratamiento curativo para la artritis

reumatoidea, afecciones vasculares y padecimientos geriátricos. Posteriormente se llega a recetar compuestos de radio ( $Ra_{-226}$ ) para afecciones como la caída del cabello, el decaimiento general, el tratamiento de la gripa...

Charles Glover Barkla, 11 años después (1906), prueba que los rayos X son ondas transversales (como la luz) y no ondas longitudinales, y fijó su característica de *ondas electromagnéticas*. Pero, ¿cuál es entonces su longitud de onda? Para medirla hay que pasar la radiación a través de rejillas de difracción; Röntgen no lo había logrado pues utilizaba rejillas para luz visible, que son gigantescas para los rayos X: la longitud de onda de los rayos X es 100,000 veces más pequeña que la de la luz visible. En 1912, Max Von Laue, reconoce las rejillas tridimensionales de la naturaleza: *los cristales*, y al experimentar mediciones de difracción de rayos X en cristales hace posible obtener esta información.

Pero no siempre tener el fenómeno ante los ojos lleva al descubrimiento científico. Sir William Crookes, 25 años antes del descubrimiento de los rayos X, tenía problemas con sus placas fotográficas, pues siempre se le velaban aunque las guardaba cuidadosamente en su mesa de trabajo, al lado del tubo de descarga de rayos catódicos: Crookes tenía ante sí los rayos X pero no reconoció ese efecto.

Con la primera y segunda guerras mundiales se da amplia utilización a las radiaciones y se avanza en elementos de equipos, materiales opacos de contraste, fuentes de alta energía para la radioterapia, aplicadores de radio para el tratamiento de cáncer y en mejorar las técnicas clínicas. Se logra la intensificación electrónica de la imagen en movimiento en la fluoroscopia; equipos especiales como

los mamógrafos y otros. Derivados del sonar y del radar se generan los equipos ultrasónicos, que resultan muy atractivos para examinar a las embarazadas en busca de anomalías fetales, diagnóstico y vigilancia de ciertas parasitosis (amibiasis, esquistosomiasis y enfermedad de Chagas).

En 1979, GN Hounsfield recibe el premio Nobel por su invención de la tomografía computadorizada, que permite estudiar cortes del cuerpo en los que se combinan miles de elementos de información para producir una imagen clara que revele nuevos datos a radiólogos y médicos. Diez años después surge la resonancia magnética, en la que se utilizan campos magnéticos artificiales intensivos para producir señales de radio a partir del cuerpo del paciente, que traducidas por computadores dan imágenes detalladas y en color. La introducción en la práctica clínica de las técnicas de Doppler ha hecho posible observar la actividad cardíaca fetal y visualizar el flujo sanguíneo en el interior de arterias y venas.

A partir de 1948 se inicia la inyección (marcado) en el hombre de radioisótopos artificiales, p.e., al observar la fijación del yodo radiactivo ( $I_{-131}$ ) en la glándula tiroides se puede medir su radiactividad y así evaluar su actividad funcional desde un punto de vista morfológico. Con la aparición de la escintigrafía y las cámaras de centelleo se obtienen imágenes de calidad que permiten evaluar la función de cualquier órgano determinado del cuerpo (gammagrafía ósea con fosfato marcado; la gammagrafía tumoral, miocárdica y por perfusión cerebral), luego las cámaras de positrones (tomografía de emisión de positrones), la tomoescintigrafía y el diagnóstico funcional por imagen, hacen que la medicina nuclear se convierta en una de las ramas más diná-

micas de la imagenología médica.

Con la radioterapia se busca destruir selectivamente las células responsables de los fracasos postoperatorios en más de 90 % de los casos de los tratamientos contra el cáncer. Se maneja la radioterapia externa (con equipos de cobaltoterapia, rayos X de alta energía, aceleradores lineales de fotones y electrones); la braquiterapia con fuentes radiactivas colocadas en los tejidos o cavidades naturales durante cierto tiempo; la radiofísica médica que permite medir la cantidad exacta de radiación que se debe administrar al paciente y distribuirla de modo adecuado en los tejidos para destruir la neoplasia cancerosa sin alterar el tejido sano; y la radiobiología que permite conocer los mecanismos de acción de las radiaciones y su uso óptimo tanto en el tejido normal como en el patológico.

Los servicios radiológicos de diagnóstico, tratamiento y prevención (protección contra posibles riesgos) se conciben actualmente en beneficio de toda la comunidad en lugar de concentrarlos en un grupo o una enfermedad concretos.

Otros usos de las radiaciones son el empleo de la radiación ultravioleta, en procesos de desinfección y enfermedades cutáneas; del láser en las operaciones quirúrgicas; de los microscopios electrónicos; unidades diatérmicas de microondas.

### LA PROTECCIÓN RADIOLÓGICA

Es importante incorporar los conceptos de protección radiológica en la planificación de los servicios de diagnóstico y tratamiento, así como coordinar los métodos de garantía de la calidad y seguridad radiológica. El ser humano está expuesto naturalmente a las sustancias radiactivas presentes

en la tierra y el cosmos. A nivel mundial, la dosis media por persona es de 2 milisievert (mSv) al año, lo que representa una dosis 10 veces mayor que la que se puede recibir con un examen sencillo por rayos X, en un procedimiento y equipos con garantía de calidad.

Los primeros efectos identificados fueron los de carácter agudo: eritema cutáneo, cataratas y descenso de la producción de células sanguíneas, cuando se recibían dosis más de mil veces mayores que las que recibe al año una persona corriente a partir de la radiación natural. Más tarde se descubrieron los efectos carcinogénicos (estudio en pacientes que aplicaban radio en las esferas de los relojes) Después de Hiroshima y Nagasaki epidemiológicamente se demostró que la probabilidad del cáncer aumentaba con la dosis absorbida de radiación.

Las personas que trabajan con radiaciones y en consecuencia los pacientes, están expuestos en forma inevitable a dosis pequeñas de radiación en circunstancias normales. Cada exposición a las radiaciones puede tener efectos tan negativos, como la aparición de efectos carcinogénicos. Por tanto, la exposición a las radiaciones debe estar suficientemente justificada y mantenerse lo más baja posible. Así la exposición ocupacional no debe exceder de 20 mSv al año y ningún miembro del público debe recibir más de 1 mSv al año.

En igual forma, donde se utilizan radiaciones con fines médicos, habrá que introducir medidas de seguridad en el diseño, uso, reparación, mantenimiento y eliminación final de los emisores radiactivos.

Un aspecto crítico es el ético en materia de disponibilidad, accesibilidad y asequibilidad de los servicios radiológicos. ¿A quién incumbe la res-

ponsabilidad de que no quede desatendida la mayoría en aras de algunos privilegiados? ¿Son esos servicios un derecho o un privilegio? Se presenta entonces el equilibrio entre autoasistencia, equidad, justicia social, bienestar humano y derechos de los débiles y, por otra parte, aumento de los gastos, relación costo-beneficio, distribución de recursos o exclusión de ciertos grupos sociales. Así la medicina deja de ser un arte humanístico para convertirse en una ciencia compleja que cuesta mucho dinero (un tomógrafo computadorizado puede costar 500,000 dólares).

Wilhelm Konrad Röntgen. Nace el 27 de marzo de 1845 en Lennep, distrito del Ruhr, Alemania. Su infancia y adolescencia la pasa en Apeldoorn, Holanda. Hace estudios universitarios en la Escuela Politécnica de Zurich, donde se gradúa como Ingeniero Eléctrico. Apasionado por la física y las matemáticas, trabaja en Zurich con Rudolf Clausius y August Kundt, famosos por sus estudios en acústica. Kundt dirige su tesis doctoral en física experimental "Estudios sobre gases" y así inicia su carrera científica.

Durante 6 años trabaja en equipo con Kundt y luego va a la Universidad de Würzburg hasta 1872. En Estrasburgo inicia su carrera académica como docente e investigador consagrado y dedicado. En 1888 publica sus estudios sobre los efectos magnéticos producidos en dieléctricos cuando éstos se mueven en campos eléctricos y cómo esto coincide con las ecuaciones de Maxwell. Poco después regresa a la Universidad de Würzburg como director del nuevo Instituto de Física, hasta 1894 cuando es nombrado rector de la misma universidad y en 1895 descubre los rayos X. Ya como científico afamado, en 1900, el gobierno de Baviera lo

nombra director del Instituto de Física de la Universidad de Munich hasta 1920 cuando se pensiona.

Aunque Röntgen se esforzó por evitar que su grandioso descubrimiento cambiara su vida, le tributaron gran cantidad de honores, entre ellos la medalla Rumford en 1896, el premio Nobel en Física en 1901; en Potsdam, el kaiser Guillermo II hizo erigir una estatua sobre un nuevo puente. Prefirió llevar una vida modesta, y por ello nunca patentó el método para producir rayos X. Debido a esto empobreció en medio de la hiperinflación que afectó a Alemania después de la Primera Guerra Mundial. Murió a la edad de 78 años en Munich el 10 de febrero de 1923.

### LA BIOFÍSICA DE LAS RADIACIONES

La radiación radiactiva se puede definir como la emisión de partículas subatómicas o simplemente energía pura a partir de los átomos que conforman un cuerpo dado. La causa fundamental de la radiactividad o de las radiaciones en general no es otra sino un exceso de masa o energía que los átomos o los núcleos emiten a fin de liberarse del sobrante y obtener su estabilidad.

Así, la radiación radiactiva se puede clasificar en dos categorías principales: radiaciones ionizantes y radiaciones no ionizantes. La radiación no ionizante incluye todas las formas de radiación cuya manera primaria de interactuar con la materia no envuelve la producción de pares iónicos. Un par iónico consta de un electrón, con carga eléctrica negativa y el átomo del que se ha desprendido, que por tanto poseerá una carga eléctrica positiva. Las fuentes de radiación no ionizante incluyen: ondas de radio y televisión, radar, microondas, lámparas ultra-

violeta, rayos láser, rayos infrarrojos y equipos especiales como diatermias, radioteleimetrías, etc. Su manera principal de interacción con la materia consiste en las excitaciones atómica y molecular.

Las radiaciones ionizantes son las que tienen suficiente energía para romper enlaces químicos y producir pares iónicos (ionización) durante su interacción con la materia o su paso por ella. Se dividen en dos grupos:

*Radiaciones corpusculares*, que tienen masa y carga [protones, electrones, radiación alfa (a) y beta (b), neutrones].

*Radiaciones electromagnéticas*, que son energía pura y tienen características similares a la luz visible y a las ondas de radio (radiación gamma (g), radiación X).

*La acción biológica* de las radiaciones ionizantes y no ionizantes depende sobre todo de sus niveles de energía y en segundo lugar de varios factores, a saber, tipo de tejido irradiado, área corporal, edad del individuo, sexo, frecuencia y acumulación de dosis, entre otros.

De acuerdo con el nivel de energía se pueden tener las radiaciones de bajo nivel que actúan ya sea superficialmente (rayos ultravioleta, microondas, infrarrojos, rayos X blandos) o con liberación de energía en dosis pequeñas que originan excitación electrónica y absorción térmica por las moléculas y tejidos (rayos ultravioleta duros, microondas, diatermias, rayos b de baja energía, rayos X semiduros) que llegan a originar efectos somáticos a largo plazo, p.e., la inducción de cáncer en tejidos sensitivos como son la médula ósea (leucemia), tiroides, ganglios linfáticos y tejido reticular, tracto gastrointestinal (faringe, estómago e intestino grueso); inducción de cataratas, infertilidad temporal, defectos de crecimiento y desarrollo

fetal. Se consideran dosis bajas a las menores al máximo permisible de 5 mSv por año.

Las radiaciones de nivel alto implican dosis de radiación ionizante capaces no sólo de inducir más rápidamente efectos somáticos a largo plazo, sino también efectos genéticos y hasta síndromes agudos de radiación con probabilidad de muerte caracterizados por irradiación en todo el cuerpo de dosis entre 1 y 6 Sv que produce un conjunto de síntomas como náuseas, vómito, fatiga, pérdida del cabello, irritación generalizada en las membranas del cuerpo, hemorragia, diarrea, anemia y postración total.

No todas las células y tejidos son igualmente sensibles o vulnerables a las radiaciones. Las células más activas y que crecen con mayor rapidez, tienden a ser las más radiosensibles en un tejido cualquiera, así como las que son menos especializadas.

Por esta razón, los tejidos se agrupan según su sensibilidad, en orden de radiosensibilidad: Tejido linfático, especialmente los linfocitos; tejido hematopoyético, productor de glóbulos blancos y plaquetas; tejido epitelial del tracto digestivo; tejido gonadal, los testículos son más sensibles que los ovarios; el folículo piloso, raíz del cabello; células endoteliales de los vasos sanguíneos y el peritoneo; epitelio del hígado y suprarrenales; otros tejidos: óseo, muscular y sistema nervioso.

El área expuesta es de importancia pues si compromete varios de los tejidos altamente sensibles mencionados, puede dar lugar a respuestas específicas como el síndrome del tracto gastrointestinal. Para determinar las dosis máximas permisibles a la radiación, se supone que la irradiación se suministra al cuerpo entero.

Los efectos de la radiación difieren grandemente de acuerdo con la edad. La mayor sensibilidad la tiene el ser humano en su etapa fetal, y varía hasta completar la madurez, donde se vuelven importantes los efectos genéticos. Se han investigado casos de irradiación fetal con dosis altas de radiación y se ha observado microcefalia, retardo mental y alteración del crecimiento corporal, además del aumento en la frecuencia de aparición de leucemia y cáncer del sistema nervioso central (casos de madres sometidas a estudios radiográficos durante el embarazo); las alteraciones a nivel de los cromosomas de las células gonadales generan síndromes como el de Down (mongolismo), síndrome de Turner (retardo mental, esterilidad y atrofia sexual).

Entre mayor sea la cantidad de radiación recibida, más agudos serán los efectos que se producen, pues existen relaciones cuantitativas entre la extensión del daño y su dosis, pero aun así persiste el problema para establecer las dosis límites debido a que no hay un umbral que pueda determinar la aparición de dosis mínimas.

Los efectos finales de las radiaciones no son inmediatos; existe un período de secuencias entre la exposición y la aparición del efecto total, aunque la velocidad a la que se presentan los mecanismos de alteración a nivel bioquímico es del orden de  $10^{-16}$  segundos hasta 1 segundo donde se completan todas las reacciones radioquímicas en un tejido celular. Las mutaciones a nivel de células gonadales perduran por generaciones y se manifiestan, probabilísticamente, como cambios somáticos (labio leporino, mongolismo, leucemia, etc.) o cambios genéticos (esterilidad, atrofia de los órganos sexuales, retardo

del crecimiento, etc.).

Por último, el efecto biológico que se observa para un tipo de radiación, lo puede desarrollar cualquier otro tipo de radiación.

## BIBLIOGRAFIA

- Arias C, Skvarca J. La protección radiológica en medicina. *Rev Salud Mundial* 1995; 48: 24-25.
- Bhargava S. Aspectos éticos de las nuevas tecnologías. *Rev Salud Mundial* 1995; 48: 28-29.
- Comissão e Dosimetria (IRD). *Protección radiológica en radiología diagnóstica*. Brasil, 1993; pp. 2-5.
- Curso sobre protección contra las radiaciones*. Escuela de Salud Pública del Perú, Ministerio de Salud, Publicación Científica N° 7; Lima: 1968; pp:1-8.
- Dalrymple G, Gaulden ME, Kallmorgen GM, Vogel H. *Medical radiation biology*. Philadelphia, London. WB Saunders Co, 1973; pp. 250-260.
- Efectos genéticos de las radiaciones*. Comisión de Energía Atómica. USA. División de Información Técnica, Oak Ridge, 1968; pp. 29-42.
- Gharbi H, Wachira M. La ultrasonografía en los países en desarrollo. *Rev Salud Mundial* 1995; 48: 16-17.
- Gómez-Moreno B. Cien años de los rayos X. *Revista Innovación y Ciencia* 1995; 4: 18-25.
- Hanson PG. Efectos sobre la salud de residentes de regiones con elevada radiación de fondo. *Bol OPS/OMS* 1984; 97: 377-95.
- Healy JW. Radiation protection standards. A historical perspective. *Health Phys* 1988; 55: 125-26.
- Horiot JC, Naudy S. Radioterapia: casi centenaria, y sin embargo joven. *Rev Salud Mundial* 1995; 48: 20-21.
- La radiación y el organismo humano*. Comisión de Energía Atómica. USA. División de Información Técnica, Oak Ridge, 1968; pp. 58-96.
- Linton O, Marasco J. Radiología: un siglo de progresos. *Rev Salud Mundial* 1995; 48: 4.
- Manual básico de protección radiológica*. Bogotá, Ministerio de Salud de Colombia, INAS, OPS/OMS. 1981, 1: 3-25.
- Margulis A. La radiología en los próximos 100 años. *Rev Salud Mundial* 1995; 48: 26-27.
- Palmer P, Holm T. Fundamentos del diagnóstico por imagen. *Rev Salud Mundial* 1995; 48: 12-13.
- Sasaki Y, Kusakabe K. La medicina nuclear. *Rev Salud Mundial* 1995; 48: 18-19.
- Tan L. El diagnóstico por imagen en la medicina moderna. *Rev Salud Mundial* 1995; 48: 8-9.
- Tubiana M, Hanson G. Radiomedicina para todos. *Rev Salud Mundial* 1995; 48: 3.